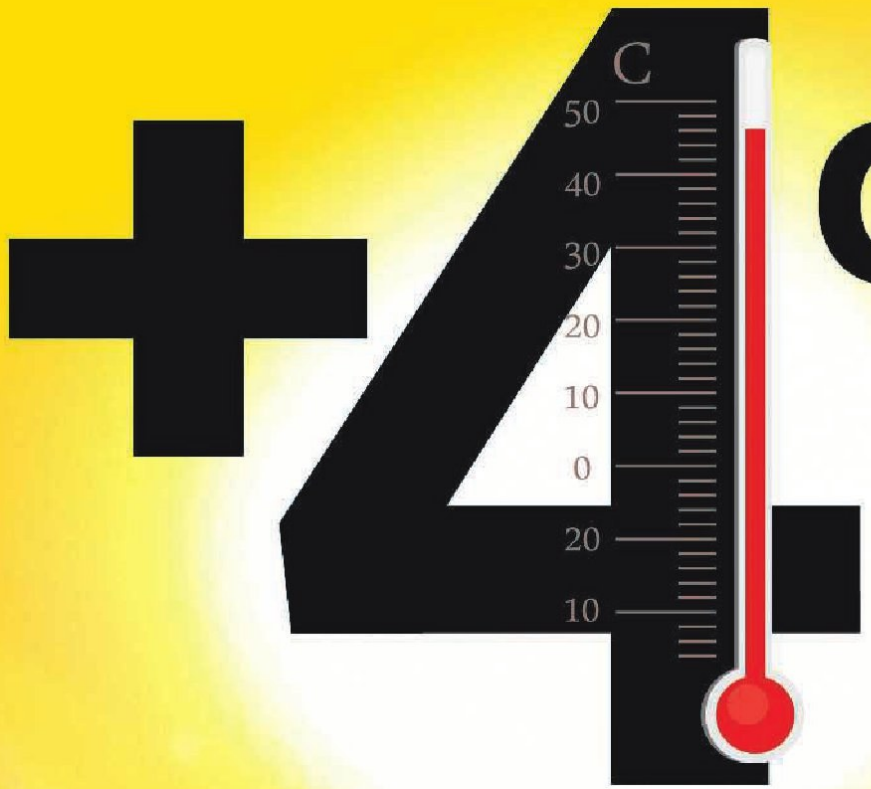
SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

©CONNORS/SHUTTERSTOCK - M. MEISSNER/AP/SIPA

L'IA AU SERVICE DU FOOT

p.33

La France à +4 °C



CE QUI VA CHANGER

Vie quotidienne • Santé • Agriculture p.38

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 928 - JUIN - LA FRANCE À +4 °C

JUIN 2024 - N° 928 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-MSA 8,20 $

L 13418 - 928 - F: 5,30 € - RD

NOUVEAU CLE COUPÉ

Disponible en hybride rechargeable*
et en cabriolet

Mercedes-Benz

A
B
C 125 g CO_2/km
D
E
F
G

*Hybride Rechargeable disponible sur le modèle Coupé mais pas sur le Cabriolet. Données WLTP cycle mixte au 25/04/24 mais susceptibles d'évoluer selon homologation en Allemagne conformément à la réglementation en vigueur de la gamme CLE Coupé et Cabriolet (hors AMG) : Consommation : 0,5-8,5 l/100 km. Émissions CO_2 : 13-192 g/km. Autonomie électrique CLE Coupé Hybride Rechargeable : 100-112 km. Mercedes-Benz France - RCS Versailles 622 044 287.

Pour les trajets courts, privilégiez la marche ou le vélo. #SeDéplacerMoinsPolluer

ÉDITORIAL

BERNARD MARTINEZ

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

Défis du XXIe siècle

Un pavé dans la mare… scientifique. *« La France ne peut pas affronter les défis du XXIe siècle les yeux bandés »*, ont écrit avec quelque âpreté à la mi-avril le président et un membre du Collège des sociétés savantes académiques de France, dans le magazine internationalement connu *Science*. Les yeux bandés ? Il y a urgence que les temps changent, jugent-ils en effet, en l'occurrence que soient mises en œuvre des *« politiques à long terme fondées sur la science »*. Un appel d'autant plus crucial que les générations entrantes, dans les domaines scientifique et technique, ont les yeux bien dessillés.

Alertes du Giec. À écouter les jeunes docteur(e)s et ingénieur(e)s, on les entend en effet douter de l'influence réelle qu'ont les données et études scientifiques sérieuses. Auront fortement marqué leurs esprits le décalage entre les alertes du Giec sur le changement climatique depuis trois décennies et les prises (ou non-prises) de décision concernant les rejets de gaz à effet de serre, COP après COP. Quelles stratégies pour aujourd'hui ? Dans le BTP, par exemple, comment construire avec de nouveaux matériaux minimisant ces rejets et adopter une économie circulaire permettant de réutiliser les déchets induits ?

Protéger l'océan. Comment protéger l'océan, à la fois garde-manger pour des milliards d'humains et régulateur du climat planétaire… En médecine, quelles recherches privilégier et médications assurer (cancers, maladies infectieuses, mentales, cardio-vasculaires, Alzheimer…) pour des populations vieillissantes ? Jamais les rapports entre science et sociétés n'auront semblé aussi essentiels. Et si l'adaptation au changement climatique — comme développée ce mois-ci dans *Sciences et Avenir-La Recherche* — constitue l'un des paramètres fondamentaux structurant l'évolution du monde, il n'est pas le seul.

Plans sur la comète. Urbanisation galopante, démographie déséquilibrée, accélération du changement technologique, amenuisement des ressources, manque d'eau douce, perte de biodiversité… Impossible de négliger ces mégatendances, au risque de ne tirer que des plans sur la comète. Histoire de rendre l'avenir moins imprévisible, les institutions planétaires — des agences internationales aux plus grandes entreprises et universités, des compagnies d'assurances aux investisseurs à long terme et *think tanks*… s'efforcent donc de réunir les données les plus fiables possibles à leur sujet.

IA incontrôlée. Dans le même temps, prière de prendre garde aux risques majeurs, dont on ne sait jamais exactement quand ils vont se produire. Deux domaines suscitent aujourd'hui une forte inquiétude, estime ainsi Marc Giget, président du Club de Paris des directeurs d'innovation : la cybercriminalité (ainsi des multiples attaques contre les hôpitaux, des *fake news* d'avant élections, etc.) et la possibilité d'une *« intelligence artificielle incontrôlée »*. On conviendra que scientifiques et ingénieurs ont ici, plus que jamais, tout leur talent à faire valoir. Avec l'éthique à la hauteur et sans œillères. ■

COURRIER

« La première seconde de l'Univers »
(Sciences et Avenir–La Recherche n° 927, mai 2024)

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

► Bravo pour votre dossier ! Ses auteurs sont parvenus à exposer des notions difficiles en termes clairs, simples, accessibles, sans avalanche de chiffres et de formules. Des comparaisons judicieuses et éclairantes émaillent le texte. J'ai adoré celle d'un champ et d'un lac… où toute particule se retrouve… mouillée ! Certes, comparaison n'est pas raison mais reste un outil pédagogique efficace.
Pour la première fois, j'ai ressenti à quelle réalité physique peut correspondre l'inflation cosmique. Auparavant, j'admettais cette inflation de confiance envers les cosmologistes mais cela restait confus, abscons. Là, tout s'est éclairé, en guère plus de 10^{-43} seconde !

Lucien Lacroix

► En lisant le dossier sur la « première seconde » de l'Univers, je me demandais à quoi correspondait l'unité seconde dans un univers naissant, soumis à des conditions inimaginables, univers modifiant fondamentalement les notions d'espace et de temps. L'emploi de l'unité seconde a-t-il le moindre lien avec la seconde que nous connaissons ? Pourquoi n'utilise-t-on pas une autre unité abstraite pour tenter de mesurer ce temps si particulier ?

Benoît Lauth

S. et A. : La seconde utilisée dans le dossier est bien celle que nous connaissons. Et, effectivement, les cosmologistes qui s'intéressent aux « premiers instants » de l'Univers utilisent plutôt la taille comme mesure du temps grâce à ce que l'on appelle le *e-folding*. À chaque *e-fold*, la taille de l'Univers grandit d'un facteur *e*, qui est une constante égale à 2,71828. L'inflation cosmique, par exemple, a duré *e-folds*, ce qui correspond bien à une dilatation d'environ 10^{26}.

► Dans votre dossier, je comprends que la taille de l'Univers est de 10^{-35} mètre à la 10^{-43} seconde (mur de Planck) *(p. 31)*, passe à la taille d'un atome à 10^{-35} seconde et à une année-lumière à 10^{-32} seconde *(p. 34)*, ça fait beaucoup même pour l'inflation cosmique, d'autant plus que sa taille repasse à 1 mètre *(p. 40)* puis à la taille de l'orbite de la Terre à 10^{-12} seconde *(p. 41)*… Ne faut-il pas revoir la chronologie ?

Jean-Bernard Gramunt

S. et A. : En réalité, il n'est pas écrit que l'Univers passe de la taille d'un atome à celle d'une année-lumière au moment de l'inflation. Il est écrit que la taille de l'Univers est multipliée par un facteur 10^{26}. Et l'on donne comme exemple que cela équivaut à passer de la taille d'un atome à une année-lumière. Mais l'Univers, au moment de l'inflation, est plus petit qu'un atome. Ceci rectifié, il n'y a plus de problème dans la chronologie.

Précision

DANS NOTRE ARTICLE « EUCLID MÈNE L'ENQUÊTE » (S. ET A. N° 925, P. 32), nous avons assimilé par erreur les baryons noirs à de la matière noire. L'astrophysicien David Elbaz nous signale qu'ils désignent en réalité de la matière classique, baryonique, mais que l'on ne parvient pas à détecter, notamment parce qu'elle est très diluée.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Bruno Braucci/Ch. Abramowitz

En partenariat avec
SCIENCES AVENIR La Recherche

france culture
L'esprit d'ouverture

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

L'urgence de s'adapter

La lutte contre le réchauffement climatique ne va pas assez vite. En France métropolitaine, la température moyenne est déjà supérieure de 1,7 °C à celle qui prévalait à l'ère préindustrielle. L'objectif est et doit rester d'arrêter le réchauffement, voire de l'inverser. Mais la France se réchauffe plus vite que la moyenne du globe et la perspective — désormais plausible — d'un monde à +3 °C en 2100 veut dire une France à +4 °C. Il ne s'agit pas de jouer à se faire peur. Plutôt de comprendre non seulement l'étendue des dangers si ce scénario se réalisait, mais aussi celle des adaptations qui seront nécessaires pour y faire face.
Il faut déjà commencer par arrêter de parler au futur des effets du réchauffement. Les agriculteurs sèment plus tôt le blé ou le tournesol, cultivent le maïs dans le nord de l'Hexagone et la vigne dans la Manche. Le moustique-tigre a colonisé l'ensemble de la France métropolitaine et la première épidémie de dengue est probablement imminente. Durant l'été, les TGV comme les trains régionaux sont parfois ralentis à cause de la dilatation des rails et des caténaires. Qu'en sera-t-il à +4 °C ? Concrètement, comment ferons-nous pour vivre, cultiver et se soigner ? C'est la grande enquête que nous avons menée ce mois-ci en partant aussi à la recherche d'initiatives qui nous aideront à nous adapter. En Gironde, des villes envisagent de se déplacer pour fuir l'érosion côtière. À Lyon ou à Paris, de grands efforts de végétalisation sont déployés par les mairies. En Nouvelle-Aquitaine, les agriculteurs expérimentent des cultures semi-tropicales comme le sorgho. En Auvergne-Rhône-Alpes, on observe les bienfaits d'un coléoptère qui s'attaque à l'ambroisie pour restreindre les pollens, et par conséquent les allergies. Réussir à conjuguer lutte contre le réchauffement et adaptation à celui-ci est la seule voie pour maintenir un territoire vivable. Sans plus attendre. ■

> « Il faut déjà commencer par arrêter de parler au futur des effets du réchauffement »

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59 - Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33 Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI-GAVAGE, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, C. CAZENAVE, N. GUTIERREZ C., J.-F. HAÏT, Y. HERRERA, A. INGRAND, P. KALDY, M. PARRA
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Sarah BOULVARD (journaliste vidéaste en alternance) - 01.55.35.56.51, Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés », un encart « Sophia Boutique – Montre Nato - Fête des pères » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés, ainsi que les encarts « Linvosges » et « First Voyages » jetés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 00368636. Distribué par MLP.

Fleury Michon

UNE PURÉE HARICOTS !?

Nouvelles Tranches Végé

Un tout nouveau produit : de délicieuses tranches à base de légumineuses, pratiques comme le jambon, idéales pour toutes vos recettes chaudes et froides.

Elles sont cuisinées en Vendée à partir de légumineuses entières et avec des ingrédients simples comme le blanc d'œuf et des bouillons de légumes.

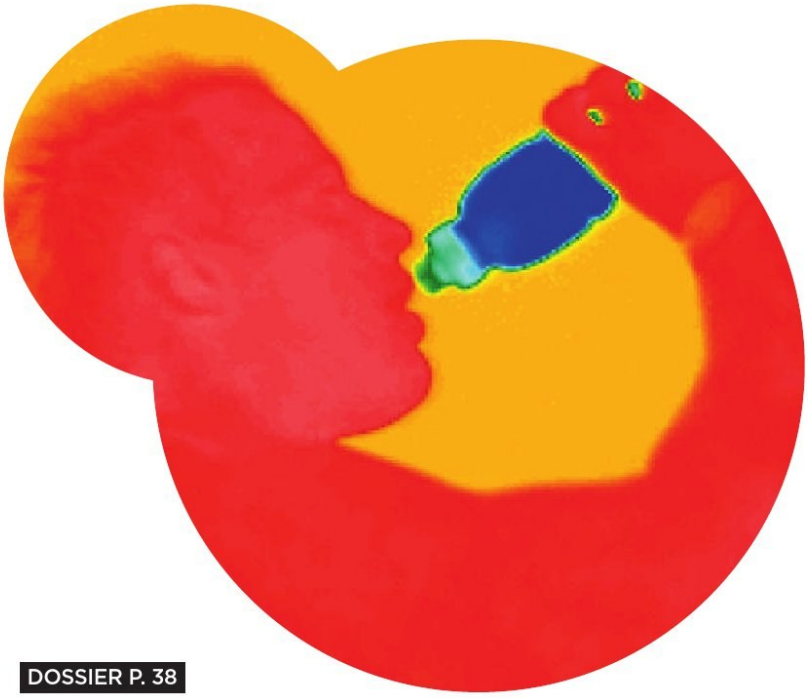
Riches en protéines et sources de fibres, elles permettent de profiter des bienfaits des légumineuses dans le format ultra pratique d'une tranche, et seront appréciées par les petits comme les grands gourmands !

Découvrez les Tranches Végé sur www.fleurymichon.fr

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE. WWW.MANGERBOUGER.FR

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 928 / Juin 2024



DOSSIER P. 38

Vivre, cultiver, soigner dans une France à +4 °C

Le réchauffement climatique va bouleverser la vie des Français : tout le monde sera concerné et peu de zones géographiques y échapperont. À quoi ressemblera la vie quotidienne dans un pays réchauffé de 4 °C en 2100 et comment s'y adapter ? Éléments de réponse dans ce dossier prospectif.

P. 33

L'algorithme, champion du corner

À l'heure où s'ouvre le championnat d'Europe de football, retour sur une intelligence artificielle créée par Google qui promet d'augmenter les chances de marquer sur corner.

P. 60

Greffes : améliorer la transplantation d'organes

La pénurie d'organes que connaît la France incite les médecins à innover pour mieux préserver les greffons et éviter les rejets. En attendant les organes artificiels ou les xénogreffes.

P. 76

Des papyrus d'Herculanum enfin déchiffrés

Des outils informatiques non invasifs associés à de l'intelligence artificielle permettent de déchiffrer les papyrus d'Herculanum, carbonisés lors de l'éruption du Vésuve en l'an 79.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

4 **Courrier**

5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** Le voile se lève sur l'énergie noire / Les étonnants ronds de fumée de l'Etna

24 **Les promesses de l'hydrogène naturel**

30 **Ariane 6 enfin parée au décollage**

33 **L'algorithme, champion du corner**

36 **Journal de l'IA : L'intelligence artificielle se prépare pour aller à la guerre**

NATURE

12 **ACTUALITÉS** Scruter le couple plancton-atmosphère / Le tigre de Java à un poil de l'extinction

54 **Dans les coulisses de la reconstitution du dodo**

58 **Quand le sable du Sahara recouvre la France**

SANTÉ

16 **ACTUALITÉS** Un antidiabétique freine la maladie de Parkinson / Pourquoi on naît gaucher ou droitier

60 **Greffes : améliorer la transplantation d'organes**

66 **Un vaccin plus efficace contre le zona**

70 **Nutrition : Le poulpe, nouvelle star des mers**

HISTOIRE

20 **ACTUALITÉS** De splendides fresques dévoilées à Pompéi / L'incapretamento, torture du néolithique

76 **Herculanum : la technologie au secours des papyrus**

82 **Les belles lames de la Renaissance**

86 **Histoire des sciences : Les pionniers de la télégraphie céleste**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

93 **Expositions**

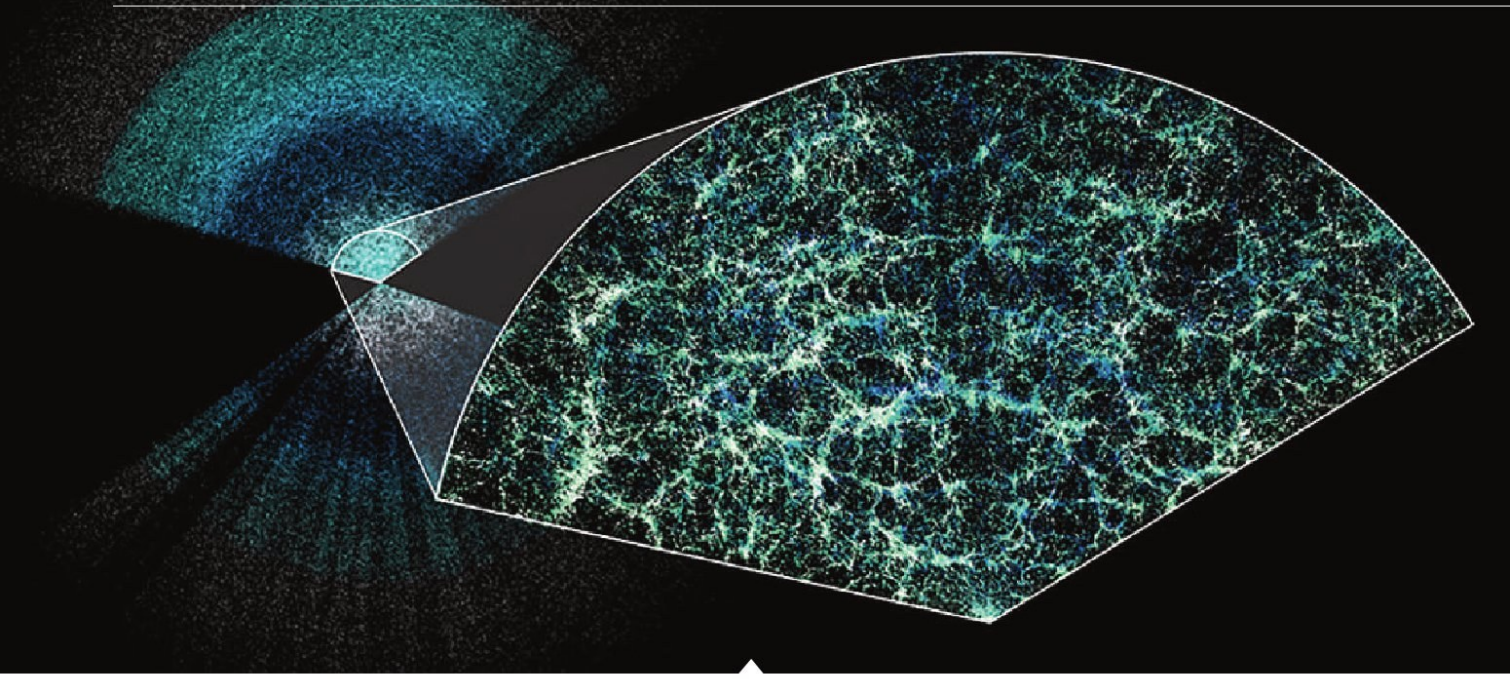
94 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Le ciel de juin**

98 **Jeux**

SPL/ SUCRÉ SALÉ - GOOGLE DEEPMIND - LAURENT MAYEUX/COLLECTIF DR - VESUVIUS CHALLENGE



L'instrument DESI a dressé la carte en 3D de 40 millions d'objets sur une distance de 12 milliards d'années-lumière. Chaque point représente une galaxie et permet ainsi de voir comment la matière est structurée dans l'Univers (zoom).

Le voile se lève sur l'énergie noire

Si elles sont confirmées, les premières observations de l'instrument DESI révolutionneraient notre compréhension de cette énergie mystérieuse à l'origine de l'expansion de l'Univers.

Lancée en mai 2021, la collaboration DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) a dévoilé une première moisson de données particulièrement prometteuse pour élucider la nature de l'énergie noire. À l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers, cette forme d'énergie est au cœur des travaux de l'instrument installé sur le site de l'observatoire de Kitt Peak, en Arizona (États-Unis). Son objectif? cartographier 40 millions de galaxies et quasars (source de rayonnement intense associée à un trou noir supermassif au cœur d'une galaxie) situés entre 1 milliard et 12 milliards d'années-lumière de nous. Cette carte en trois dimensions, dont une première ébauche a été dévoilée, permettra d'observer l'évolution dans le temps de l'action de l'énergie noire sur la matière.

Son action évoluerait au cours du temps

Compilant un an de mesures du spectrographe, ces premières données sont prometteuses pour Michael Levi, directeur de DESI et chercheur au Laboratoire national Lawrence-Berkeley (États-Unis). *« Jusqu'à présent, nous constatons un accord avec notre modèle actuel de l'Univers, mais nous constatons également des différences potentiellement intéressantes qui pourraient indiquer que l'énergie noire évolue avec le temps »*, explique-t-il.

Le comportement de l'énergie noire au fil du temps est une donnée clé pour faire le tri parmi les nombreuses hypothèses sur sa nature, comme l'expliquait Francis Bernardeau, chercheur à l'Institut de physique théorique de Saclay (Essonne), dans notre dossier consacré à ce sujet *(lire* S. et A. *n° 925). « Selon la théorie considérée, l'évolution temporelle ne sera pas la même. Dans le cas de la quintessence* [action répulsive d'un champ scalaire dans le même esprit que l'inflation cosmique], *par exemple, l'énergie noire se dilue un peu au fil du temps… Son action dans le passé est donc renforcée. Tandis que si l'énergie noire est en réalité une propriété intrinsèque de l'espace-temps, une "constante cosmologique", alors elle ne se dilue pas. »*

La confirmation que l'action de l'énergie noire évolue au cours du temps permettrait d'exclure l'hypothèse de la « constante cosmologique », qui avait été faite par Albert Einstein dans le cadre de sa théorie de la relativité générale. Il s'agit toutefois de résultats provisoires, pas assez significatifs pour trancher. *« Ceux-ci peuvent être confirmés ou infirmés avec plus de données, nous sommes donc ravis de commencer bientôt à analyser notre ensemble de données sur trois ans »*, conclut Michael Levi. **F. N.**

CLAIRE LAMMAN/DESICOLLABORATION;CUSTOMCOLORMAP PACKAGE BYCMASTRO

Les étonnants ronds de fumée de l'Etna

Ces anneaux de vapeur d'eau sont dus à la forme de la section finale de la cheminée du volcan.

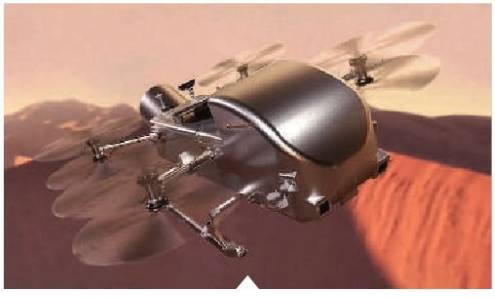
SPLASHNEWS/ABACAPRESS.COM

Le phénomène peut s'élever à une altitude de plusieurs kilomètres..

Durant plusieurs semaines, par intermittence, le célèbre volcan italien Etna a soufflé d'étonnants « ronds de fumée » dans le ciel, faisant le bonheur des visiteurs et des photographes. Décrite depuis le XVIIIe siècle, la formation de ces anneaux de vortex volcaniques n'a pourtant été comprise que récemment, grâce à des simulations réalisées en laboratoire. L'étrange phénomène s'explique à la fois par la formation de bulles gazeuses au sommet de la cheminée et par une régularité dans la forme de la bouche de l'Etna. *« Ces ronds sont dus à la forme de la section finale de la cheminée »*, confirme Carmelo Ferlito, chercheur à l'université de Catane (Italie) et coauteur de l'étude publiée en 2023. Comme en témoigne leur couleur blanche, ils sont composés en grande partie de vapeur d'eau s'enroulant au niveau des bords des évents, formant des vortex tubulaires. Si les anneaux contenant moins de vapeur disparaissent en quelques dizaines de secondes, d'autres peuvent s'élever sur plusieurs kilomètres et atteindre un rayon de dizaines de mètres. **A-S. T.**

EN DEUX MOTS

ESPACE Le contact avec la sonde Voyager 1, filant dans l'espace interstellaire 46 ans après son lancement, a pu être rétabli après cinq mois d'interruption grâce à une astuce de la Nasa. **IA** Une étude montre que des participants ayant débattu avec le modèle de langage GPT-4 sont plus susceptibles de changer d'avis que ceux qui débattaient avec des êtres humains. **LUNE** Le premier non-Américain à marcher sur la Lune à l'occasion de la mission Artemis 3 sera un Japonais, a annoncé la Nasa.



NASA/JOHNS HOPKINS APL/STEVE GRIBBEN

La mission se déroulera en 2034 (vue d'artiste).

Un drone va voler sur Titan

ESPACE La Nasa a confirmé le financement de la mission Dragonfly, qui doit envoyer un drone dans l'atmosphère de Titan, l'une des plus fascinantes lunes de Saturne. Estimée à 3,35 milliards de dollars, elle doit décoller en juillet 2028, pour une arrivée en 2034. L'engin d'une demi-tonne y recueillera des échantillons de sol et d'atmosphère et traquera d'éventuelles molécules organiques prébiotiques, jusqu'aux acides aminés pouvant mener à l'apparition de la vie. **F. N.**

Virgo redémarre enfin

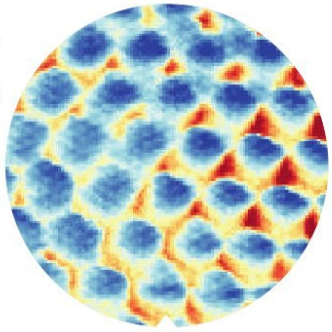
ASTROPHYSIQUE

Le détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo, situé en Italie, a débuté une nouvelle campagne d'observations, après quatre ans de mise à l'arrêt afin d'améliorer sa sensibilité. Il rejoint ainsi son homologue américain Ligo pour une traque de ces vibrations de l'espace-temps provoquées par des fusions d'étoiles à neutrons ou de trous noirs. 200 événements sont espérés d'ici à février 2025. F. N.

Premières images d'un cristal d'électron

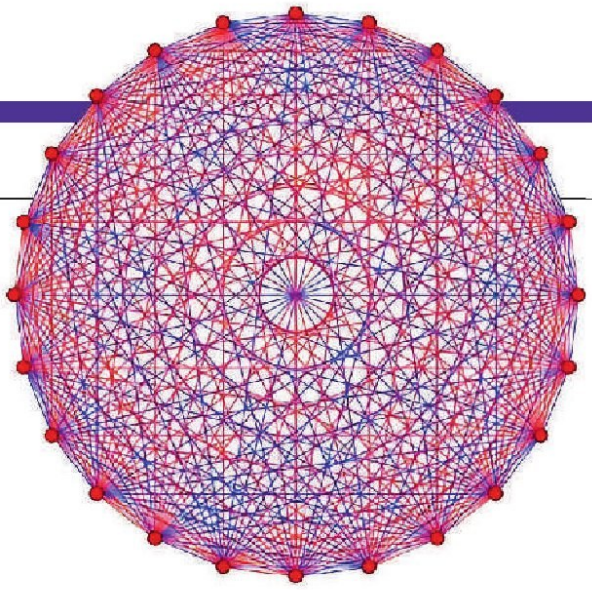
PHYSIQUE Prédit en 1934 par Eugene Wigner, le cristal d'électron se compose uniquement d'électrons sagement ordonnés. Depuis lors, de nombreuses équipes ont prétendu l'avoir synthétisé, mais sans parvenir à le voir directement. Pour la première fois, des chercheurs ont réussi, grâce à un microscope à effet tunnel, à imager ce cristal produit à partir de deux fines feuilles de graphène. Ils ont pu visualiser des électrons aux sommets de triangles identiques, comme prévu par Eugene Wigner. **F. N.**

SOURCE : YEN-CHEN TSUI, UNIVERSITÉ DE PRINCETON, ÉTATS-UNIS.



YEN-CHEN TSUI, PRINCETON UNIVERSITY

Le cristal triangulaire a été observé directement par un microscope à effet tunnel.



Il y a toujours de l'ordre dans le chaos

Le problème mathématique de Ramsey a été résolu par deux chercheurs américains près de cent ans après son énoncé.

Les graphes ont servi aux deux mathématiciens pour étudier les formes d'organisation.

JACQUES VERSTRAETE / UC SAN DIEGO

Deux chercheurs de l'université de Californie à San Diego (États-Unis) viennent de résoudre un problème mathématique formulé dans les années 1920 par le Britannique Frank Ramsey. Sa théorie suppose qu'il existe toujours un peu d'ordre dans le chaos… Prenons l'exemple d'une fête avec six invités. Selon la théorie de Ramsey, soit trois personnes se connaissent, soit trois ne se sont jamais rencontrées. Mais combien faut-il être pour que quatre personnes au moins se connaissent ? C'est à cette question aussi simple en apparence que redoutable à calculer que le duo a répondu : 18 ! À partir de cinq personnes, il faudrait examiner plus de 10^{234} configurations pour trouver la bonne… *« Il y a des parties très abstraites des mathématiques dans lesquelles cette théorie est utile,* commente Antoine Chambert-Loir, professeur à l'université Paris Cité, *mais elle se décline mal dans la vie de tous les jours. »* ■ **C. L.**

GOOGLE DEEPMIND

À VOIR SUR LE NET

Des minirobots apprennent à jouer au football

ROBOTIQUE Les résultats de ce projet de Google DeepMind sont impressionnants. Des minirobots programmables de la société Robotis maîtrisent le football après une phase d'apprentissage par essai-erreur : les algorithmes sont entraînés par simulation numérique avec des avatars sur écran, avant d'être embarqués dans les machines… qui s'avèrent bien plus douées que des robots aux gestes préprogrammés. **A. D.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Des aurores boréales observées partout en France

MÉTÉOROLOGIE SPATIALE Une tempête géomagnétique « extrême » de niveau G5 — le plus élevé en météorologie spatiale — a illuminé le ciel de superbes aurores boréales, visibles à des latitudes exceptionnellement basses, dans la nuit du 10 au 11 mai. Observé dans toute la France et jusque dans le sud de l'Europe, ce phénomène a été provoqué par des éjections de masse coronale du Soleil dirigées vers la Terre. D'autres épisodes pourraient avoir lieu dans les prochains mois, alors que notre étoile semble approcher de son pic d'activité. **H. J.**

MICHAEL PORTILLO / ONLY FRANCE / AFP

Le phénomène lumineux capté depuis la dune du Pilat (Gironde) dans la nuit du 10 au 11 mai.

33 Le nombre de masses solaires d'un trou noir dormant

ASTROPHYSIQUE L'instrument Gaia, chargé de cartographier la Voie lactée, a découvert par hasard un trou noir de type stellaire de 33 masses solaires, situé à 2000 années-lumière de la Terre. Il s'agit d'un « vrai » trou noir car il n'émet aucun rayonnement. Sa présence a été révélée par l'attraction qu'il exerce sur une étoile voisine, assez éloignée pour ne pas être aspirée. **F. N.**

SOURCE : BERRY HOLL, UNIVERSITÉ DE GENÈVE, SUISSE.

L'exoplanète à l'arc-en-ciel éternel

PLANÉTOLOGIE Un phénomène optique en forme d'ellipse, arborant les mêmes couleurs que nos arcs-en-ciel terrestres, serait visible en permanence sur WASP-76b, une exoplanète située à 636 années-lumière de la Terre. Ce que les astronomes appellent un « effet de gloire » serait dû à des nuages de particules de fer parfaitement sphériques. **J. I.**

SOURCE : OLIVIER DEMANGEON, UNIVERSITÉ DE PORTO, PORTUGAL.

ancv CHÈQUE-VACANCES CONNECT

Découvrez

le Chèque-Vacances Connect

et son application de paiement

Payer dans toutes les situations de paiement : sur place, à distance et en ligne

Régler vos dépenses au centime près, dès 20€ d'achat

Consulter votre solde en temps réel, en ligne, 24h/24, 7j/7

Vous n'êtes pas encore bénéficiaire CHÈQUE-VACANCES ?
Contactez votre CSE, COS, CAS, ou votre employeur !

EN SAVOIR + :
www.cheque-vacances.com

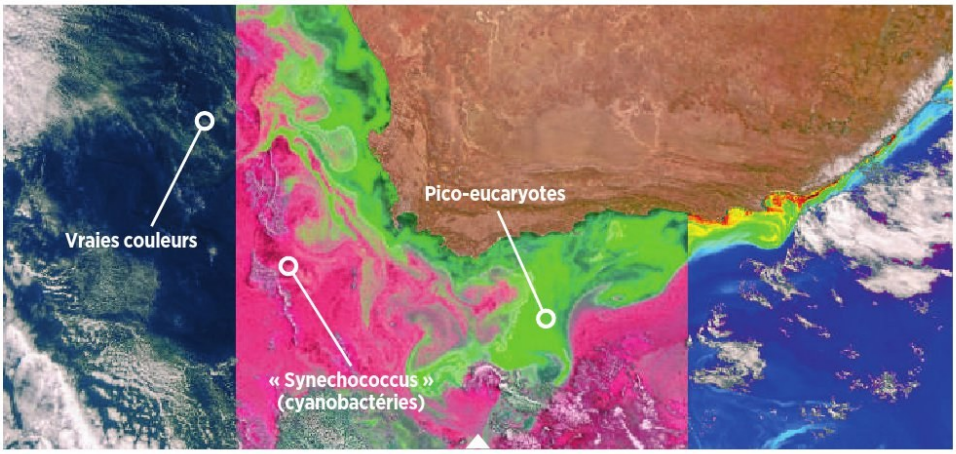
HÉBERGEMENT, SÉJOURS & TRANSPORTS,
LOISIRS & CULTURE, LOISIRS SPORTIFS, RESTAURATION

ancv CHÈQUE-VACANCES

Établissement public et commercial - 326 817 442 RCS Pontoise - Immatriculation ATOUT France : IM095130003 - Garant : GROUPAMA ASSURANCE-CRÉDIT - Assurance RCP : MAIF - Crédits photos : ©Getty, ©Shutterstock. Réalisation Compos Juliot

Scruter le couple plancton-atmosphère

Le satellite Pace d'observation des océans et de ses liens avec l'atmosphère est désormais opérationnel.



NASA

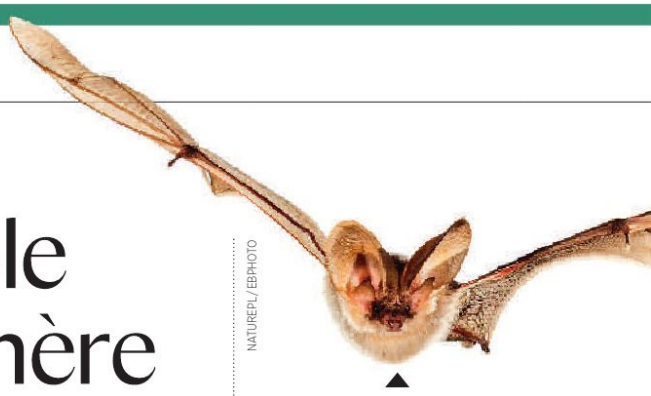
Cette première image du spectromètre de la mission Pace, enregistrée au large des côtes de l'Afrique du Sud le 28 février, a permis d'identifier par colorimétrie deux groupes différents de phytoplancton.

Comprendre la façon dont l'océan et l'atmosphère échangent du dioxyde de carbone et élucider le rôle du phytoplancton dans ce processus : tel est l'objectif de la mission Pace (Plankton, aerosol, cloud, ocean ecosystem). Lancé le 8 février, ce satellite d'observation terrestre de la Nasa est entré dans sa phase opérationnelle : ses données sont désormais disponibles pour les chercheurs du monde entier. Elles permettront d'étudier le phytoplancton dans sa globalité, soit quelque 20 000 espèces de microalgues et cyanobactéries soumises aux forces des courants. La distribution de ce premier maillon de la chaîne alimentaire dans un bassin ou une région océanique détermine la composition de la biodiversité locale, et par là même l'efficience de l'absorption du rayonnement solaire et du CO_2. D'où l'intérêt des scientifiques pour ce peuple invisible des mers et ses interactions avec les aérosols.

Un instrument doté d'un large spectre

Le satellite Pace embarque un instrument (Ocean Color Instrument) qui caractérise la couleur de l'océan sur un large spectre — de la lumière ultraviolette à l'infrarouge en passant par le visible —, soit plus de 200 longueurs d'onde. Cette capacité, inédite pour un satellite d'observation de la Terre, va permettre de différencier les diverses communautés de phytoplancton. S'y ajoutent deux polarimètres qui enregistrent la lumière polarisée réfléchie par les nuages et les aérosols, ce brouillard de particules fines qui va des embruns marins aux suies de fumées, et peut influencer le climat en affectant la quantité de lumière solaire qui atteint la surface de la Terre.

Chaque jour, Pace transmettra 3,5 téraoctets de données. La mission primaire est prévue pour durer trois ans, mais le satellite emporte une quantité d'ergol suffisante pour une prolongation de sept ans. Les données engrangées devraient permettre d'améliorer notre compréhension du rôle de l'écosystème océanique dans la machine climatique globale. ■ **S. R.**



NATUREPL/ EBPHOTO

L'oreillard gris se nourrit de ravageurs des cultures.

Les chauves-souris, alliées des agriculteurs

CHIROPTÉROLOGIE À Madère (Portugal), l'analyse de l'ADN contenu dans les excréments de trois espèces de chauves-souris endémiques de l'île (la pipistrelle de Madère, le grand oreillard et la noctule de Leisler) montre que 23 des 50 espèces de scarabées, mouches, moustiques, papillons nocturnes que ces animaux mangent sont des ravageurs des cultures, notamment la teigne du bananier *Opogona sacchari*. **L. C.**

SOURCE : ANGELINA GONÇALVES, UNIVERSITÉ DE PORTO, PORTUGAL.

+1,48 °C
La hausse de la température mondiale en 2023

CLIMATOLOGIE L'année 2023 est la plus chaude jamais enregistrée, selon le rapport publié par le programme d'observation européenne de la Terre Copernicus avec l'Organisation météorologique mondiale. L'augmentation de la température par rapport à l'ère pré-industrielle a frôlé la barre du +1,5 °C érigée en symbole par les accords de Paris de 2015, dont l'objectif était de limiter le réchauffement climatique en deçà de cette limite. **H. J.**

La forte odeur de l'urine de chat s'explique

ZOOLOGIE Lorsqu'elle est projetée sur un support vertical, un arbre ou le canapé de salon, l'urine des chats dégage une odeur plus forte, plus âcre. En cause ? non pas une différence de composition pour mieux se signaler, mais sa forte concentration en cauxine, une protéine favorisant son adhérence au support. Ce qui accroît la libération des composés odorants volatils nauséabonds. Après moult expériences pour trouver une explication chimique, les scientifiques ont simplement constaté que l'urine accrochait mieux à la surface de leurs seringues. **A.-S. T.**

SOURCE : REYKO UENOYAMA, UNIVERSITÉ D'IWATE, JAPON.

SHUTTERSTOCK

L'odeur féline nauséabonde serait due à une protéine, la cauxine.

CHERYL-S. OWEN/NATUREPL/EBPHOTO

Le caféier d'Arabie est apparu il y a au moins 350 000 ans sur les hauts plateaux du sud-ouest de l'Ethiopie.

L'histoire génétique de l'arabica reconstituée

Une étude internationale révèle pourquoi les premiers caféiers étaient si sensibles aux maladies.

Une analyse comparative des génomes de 46 caféiers sauvages ou cultivés a pu établir que le *Coffea arabica* — 75 % de la production mondiale — est apparu il y a entre 350 000 et 610 000 ans sur les hauts plateaux du sud-ouest de l'Éthiopie. Ce n'est qu'il y a 30 000 ans que la plante traverse la mer Rouge pour atteindre le Yémen, où elle est cultivée depuis le XVII[e] siècle. Du fait d'une forte pression climatique, d'une reproduction par autofécondation, mais aussi d'une sélection humaine par un petit nombre de graines à chaque étape de son périple, du Yémen en Europe puis en Amérique latine, l'arabica présente une faible diversité génétique qui l'a longtemps rendu vulnérable aux attaques du champignon de la rouille orangée. La découverte en 1927 d'un hybride spontané entre l'arabica et le robusta (plus amer) a permis de créer des variétés résistant à cette maladie. Bien que moins aromatiques, elles sont à l'origine des cafés modernes. ■ **P. K.**

Vers un béton « zéro carbone »

INGÉNIERIE Une équipe de scientifiques des matériaux et d'ingénieurs en environnement a découvert que l'utilisation de l'olivine dans le ciment pourrait permettre de produire un béton à bilan carbone négatif. Ce minéral, parmi les plus courants sur Terre, pourrait remplacer le clinker, un liant du ciment obtenu en chauffant du calcaire. De quoi réduire le coût environnemental du ciment, l'un des principaux contributeurs aux émissions de CO_2. **H. J.**

SOURCE : BARNEY SHANKS, IMPERIAL COLLEGE LONDON, ROYAUME-UNI.

IL A DIT

« Les rorquals bleus d'Antarctique sont difficiles à trouver dans l'océan Austral, mais nous détectons leurs cris à des centaines de kilomètres grâce à la technologie acoustique »

Dr Brian Miller, du département australien de l'Antarctique, chargé du recensement et du suivi des baleines bleues en danger critique d'extinction.

Le plus vieil animal bioluminescent est un corail

BIOLOGIE Jusqu'à présent, on estimait que la bioluminescence remontait à 300 millions d'années et aurait évolué chez des petits crustacés. En construisant l'arbre évolutif des 3000 espèces existantes d'octocoralliaires, de petits coraux mous aux formes extrêmement variées et dont certains sont lumineux, des chercheurs américains ont pu démontrer que le phénomène était bien plus ancien. Selon leurs analyses statistiques, il serait apparu chez ces organismes il y a au moins 540 millions d'années. **H. R.**

SOURCE : DANIELLE DELEO, UNIVERSITÉ INTERNATIONALE DE FLORIDE, ÉTATS-UNIS.

NOAA BIOLUMINESCENCE AND VISION ON THE DEEP SEAFLOOR 2015

Le Mac Pro d'Apple épinglé

POLLUTION Avec 1,647 tonne, la conception de l'ordinateur portable Mac Pro bat tous les records d'émissions de gaz à effet de serre des produits Apple, affirme le cabinet d'expertise Stocklytics. C'est 30 fois plus que le Iphone 15 ! Selon le cabinet, cette piètre performance est due à un processus de fabrication compliqué et à une recherche de puissance qui a nécessité une consommation d'énergie plus importante. Apple vise pourtant une neutralité carbone pour 2030. **L. C.**

Il y a eu deux oxygénations sur Terre

BIOCHIMIE **Le plus grand épisode d'oxygénation de la Terre, qui a permis d'atteindre les teneurs actuelles, s'est produit il y a environ 300 millions d'années, selon une étude américano-israélienne. Soit bien après l'apparition de l'oxygène (2,4 milliards d'années), métabolisé par la photosynthèse des cyanobactéries.** **S. R.**

SOURCE : MICHAL BEN-ISRAEL, UNIVERSITÉ HÉBRAÏQUE DE JÉRUSALEM, ISRAËL.

INRAE - BERTIN AND ARNOULD

Les poules aussi rougissent d'émotion

ÉTHOLOGIE À la recherche de marqueurs non invasifs capables de fournir des indications sur l'état émotionnel des gallinacés dans les élevages, une équipe française a découvert qu'elles pouvaient rougir au niveau des joues et des oreillons dans des situations de stress. Ce changement de couleur serait, comme chez l'humain, la conséquence d'une augmentation de l'afflux sanguin perceptible au travers de la peau. **A.-S. T.**

SOURCE : DELPHINE SOULET, UNIVERSITÉ DE TOURS, FRANCE.

Le tigre de Java à un poil de l'extinction

La présence du félin sur l'île indonésienne semble confirmée par l'analyse ADN d'un poil trouvé dans un parc.

Considéré comme éteint depuis 2008, le tigre de Java *(Panthera tigris sondaica)* pourrait, en réalité, toujours exister. Alors que sa présence n'a plus été confirmée dans la nature depuis 1976, lorsqu'un spécimen avait été repéré dans le parc national de Meru Betiri (Indonésie), plusieurs signalements rapportés par la suite n'ont jamais pu être confirmés. Et l'installation de pièges photographiques dans le parc de Meru Betiri entre 1999 et 2000 n'avait rien révélé non plus. Mais à la suite d'un nouveau signalement près du village de Cipendeuy, un poil a pu être retrouvé, coincé dans une clôture. D'après l'analyse ADN effectuée, l'animal est génétiquement très proche d'un tigre de Java conservé dans un musée et collecté en 1930. L'échantillon appartient indéniablement à l'espèce *Panthera tigris*, mais une analyse moléculaire plus approfondie devra confirmer qu'il s'agit bien de la sous-espèce spécifique à l'île indonésienne. **A.-S. T.**

RAHMADI RAHMAD/MONGABAY INDONESIA.

Le génome d'un tigre de Java collecté en 1930 et conservé dans un musée est très proche de celui de l'animal signalé près du village de Cipendeuy.

ARMAS SAFRUDDIN/AP/SIPA

Rakus blessé (à gauche). 44 jours plus tard, la plaie était parfaitement guérie sans infection.

Un orang-outan se soigne aux plantes médicinales

ÉTHOLOGIE Au cœur de la jungle indonésienne, un orang-outan sauvage d'environ 40 ans, blessé au visage, a été observé en train d'utiliser une plante de la pharmacopée traditionnelle pour traiter sa plaie. Après avoir mâché, sans les avaler, les feuilles de *Fibraurea tinctoria*, il en a appliqué le jus sur sa blessure à plusieurs reprises. Il a ensuite couvert sa plaie avec la pulpe des feuilles mâchées. Trois jours plus tard, la blessure s'était refermée. **A. I.**

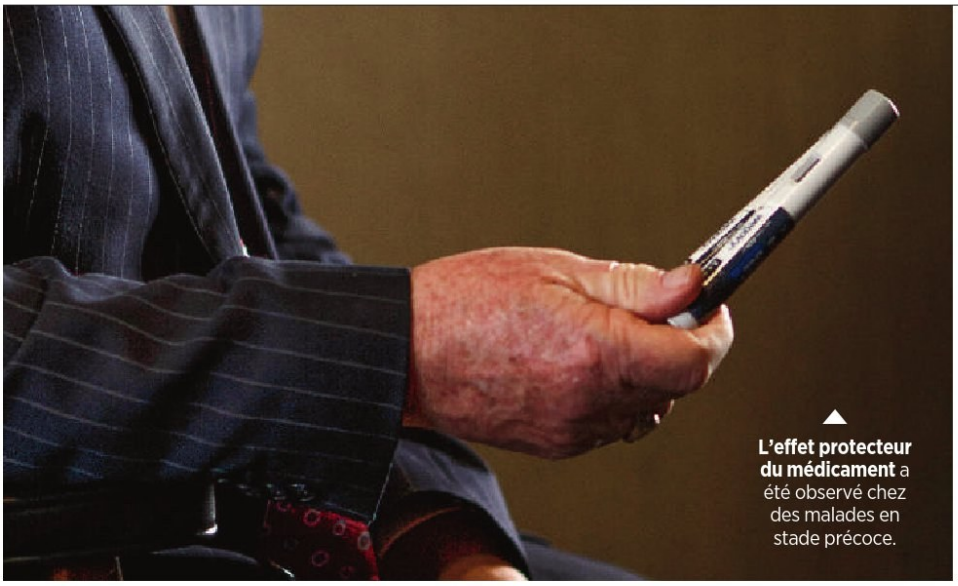
SOURCE : ISABELLE LAUMER, INSTITUT MAX-PLANCK, ALLEMAGNE.

NOUVELLE COLLECTION

LES IMAGINAIRES DE LA SCIENCE

EXPLOREZ LES GRANDES **AVANCÉES** DE LA **SCIENCE** À TRAVERS UNE **ŒUVRE** DE **SCIENCE-FICTION**

DUNOD
une page d'avance



EAMON QUEENEY/THE NEW YORK TIMES/REDUX-REA

L'effet protecteur du médicament a été observé chez des malades en stade précoce.

Un antidiabétique freine la maladie de Parkinson

La dégradation des capacités motrices s'est ralentie chez des patients traités depuis un an. Un bénéfice modeste qui reste à confirmer.

Le lixisenatide, un médicament utilisé contre le diabète de type 2, a permis de ralentir la progression de la maladie de Parkinson chez des patients traités pendant un an, rapporte une grande étude clinique française pilotée par le Pr Olivier Rascol, de la faculté de médecine de Toulouse. La dégradation des activités motrices typique de la maladie, comme la rigidité des mouvements, la lenteur des déplacements et le tremblement d'un membre au repos, a été freinée chez les 74 patients traités. Bien que modeste, ce bénéfice n'a pas été observé chez les patients du groupe témoin ayant reçu un placebo. Mieux: il a persisté deux mois après l'arrêt du traitement. La question est maintenant de savoir combien de temps il peut perdurer. Les patients âgés de 40 à 75 ans étaient tous en début de maladie et continuaient la prise du traitement classique, qui compense le déficit dans le cerveau d'un neurotransmetteur, la dopamine, dû à la destruction des cellules nerveuses qui le produisent.

Des effets secondaires digestifs

Le lixisenatide est connu pour mimer l'effet du GLP-1 (pour glucagon-like-peptide), une hormone intestinale qui stimule la sécrétion d'insuline en réponse au glucose alimentaire. Comme le GLP-1, mais sous une forme plus durable, le lixisenatide peut justement passer dans le cerveau et semble agir à la fois sur les cellules nerveuses et sur celles du système immunitaire pour réduire l'inflammation locale due à la maladie.

Deux bémols doivent cependant être apportés à ces résultats. D'abord, les injections quotidiennes de lixisenatide se sont souvent accompagnées de nausées, parfois de vomissements. Ensuite, le médicament n'a pas ralenti les autres symptômes non moteurs de la maladie, tels que les troubles cognitifs. D'autres essais de mimétiques du GLP-1 devront donc venir confirmer cet effet protecteur. En cas de succès, ces produits offriraient un moyen totalement nouveau de traiter cette maladie, voire d'autres pathologies neurodégénératives. ■ **P. K.**

Le plus petit implant cérébral au monde

NEUROTECHNOLOGIE Une équipe américaine a présenté un stimulateur cortical qui ne mesure que 9 millimètres de largeur. Un record permis par le retrait de toute batterie. Testé sur un patient, il produit lui-même son énergie grâce à des mini-antennes vibrant lorsqu'elles sont stimulées par un champ magnétique appliqué sur le cuir chevelu. Très peu invasif, le dispositif pourrait ainsi faciliter l'accès à la stimulation cérébrale profonde contre l'épilepsie ou la dépression. **H. J.**

SOURCE: JOSHUA WOODS, UNIVERSITÉ RICE, ÉTATS-UNIS.

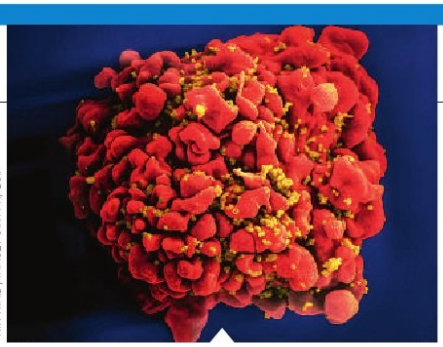
JEFF FITLOW/RICE UNIVERSITY

Le dispositif de 9 mm de large est dépourvu de batterie.

5800

Le nombre d'hospitalisations pour bronchiolite évitées

PÉDIATRIE Deux études menées par Santé publique France montrent que la campagne d'immunisation préventive lancée en septembre 2023 contre le virus respiratoire syncytial responsable de la bronchiolite du nourrisson a porté ses fruits en empêchant près de 6000 hospitalisations. Entre septembre 2023 et février dernier, plus de 200 000 doses de Beyfortus ont été administrées à des nourrissons pour les protéger de formes graves. **H. J.**



NIH-NIAID / IMAGEPOINT FR / BSIP

Lymphocyte TH9 infecté par le virus de l'immunodéficience humaine (VIH).

L'immunité paradoxale des « contrôleurs d'élite » du VIH

IMMUNOLOGIE La mystérieuse résistance qui permet à des personnes infectées par le virus de l'immunodéficience humaine de ne pas développer la maladie a été en partie élucidée. Ces « contrôleurs d'élite » du VIH présentent en fait une faible production d'interféron alpha, protéine qui intervient en principe en première ligne. Paradoxalement, cette faible activité permet au système immunitaire d'élaborer une riposte contre les premiers lymphocytes infectés. **P. K.**

SOURCE : HÉLÈNE LE BUANEC, UNIVERSITÉ DE PARIS, FRANCE.

Une chaussette électronique pour les diabétiques

DIABÉTOLOGIE Au dernier congrès de la Société européenne de cardiologie, une équipe coréenne a présenté une chaussette équipée d'un capteur permettant d'identifier la tendance des patients diabétiques à exercer une pression sur les métatarses à l'avant du pied plutôt que sur le talon. Une façon de marcher qui favorise les ulcères susceptibles de s'infecter, avec un risque accru d'amputation chez ces patients à la mauvaise circulation sanguine. **H. J.**

IL A DIT

« Le risque est qu'en infectant les volailles, puis de plus en plus les mammifères, la grippe H5N1 évolue pour infecter les humains »

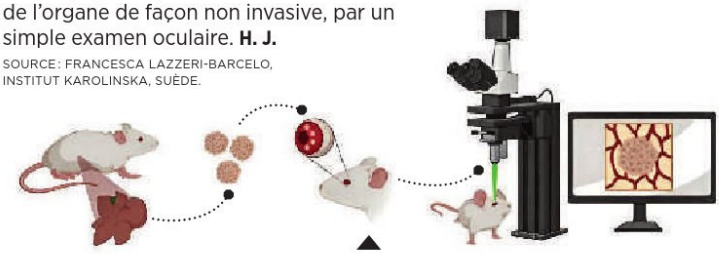
Jeremy Farrar, scientifique en chef de l'agence de santé des Nations unies, réagissant à la propagation croissante de la grippe aviaire H5N1 à de nouvelles espèces, notamment les humains, qui sont confrontés à un taux de mortalité *« extraordinairement élevé »*, selon l'Organisation mondiale de la santé.

L'œil, nouvelle fenêtre sur le foie

ENDOCRINOLOGIE Pour étudier plus facilement l'évolution des maladies du foie sur des modèles animaux, une équipe a mis au point un procédé étonnant. La transplantation de petites cultures de cellules hépatiques dans l'œil des souris a permis en effet d'ouvrir une fenêtre sur le foie des animaux. Ce qu'il se passe au niveau cellulaire dans la cornée des rongeurs reflète ainsi les changements dans l'organe des rongeurs. Grâce à cette technique, il est possible de surveiller la santé de l'organe de façon non invasive, par un simple examen oculaire. **H. J.**

SOURCE : FRANCESCA LAZZERI-BARCELO, INSTITUT KAROLINSKA, SUÈDE.

NATURE COMMUNICATIONS



Prélevées sur le foie d'une souris, des cellules cultivées puis réinjectées dans l'œil du rongeur permettent ensuite de surveiller la santé de l'organe par un examen oculaire.

MICHIGAN STATE UNIVERSITY

QUESTIONS À

Xuefei Huang

Professeur au département d'ingénierie biomédicale et chimie de l'université d'État du Michigan (États-Unis)

Un vaccin contre l'antibiorésistance

Une équipe rapporte avoir mis au point un vaccin permettant au système immunitaire de contrer des bactéries devenues résistantes aux antibiotiques. Un espoir contre l'antibiorésistance, à l'origine d'un million de décès par an dans le monde.

Qu'est-ce que l'antibiorésistance ?
Pour survivre, les bactéries développent toutes sortes de résistances contre les antibiotiques. C'est une partie de leur évolution adaptative. C'est en particulier le cas avec le staphylocoque doré, résistant à la méticilline et responsable d'infections mortelles de plus en plus fréquentes. C'est sur ce germe que nous avons testé notre formule.

Comment fonctionne votre vaccin ?
Nous ciblons un glucide, appelé PNAG, exprimé à la surface des cellules bactériennes. Il joue un rôle important dans la virulence de la bactérie. Nous utilisons un virus bactériophage équipé de PNAG pour apprendre au système immunitaire à s'y attaquer et empêcher ainsi la bactérie de survivre. L'avantage est que cet antigène est exprimé par de nombreuses bactéries, pas seulement le staphylocoque doré. Nous espérons donc en faire un vaccin à large spectre.

Il n'est donc pas question de supprimer l'antibiorésistance ?
Non. Le but est d'être immunisé contre les bactéries dangereuses, afin d'éviter d'avoir à les combattre avec des antibiotiques inefficaces. Nos essais précliniques ont été concluants. Il faut les confirmer chez l'humain. ■

Propos recueillis par C. L.

PLAINPICTURE

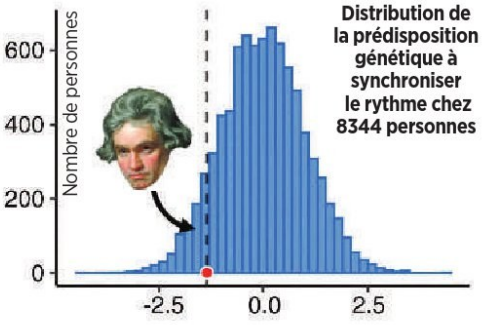
La grossesse fait vieillir, puis rajeunir

OBSTÉTRIQUE Mesurable dans les modifications épigénétiques apportées à l'ADN, l'âge biologique augmente d'environ deux ans lors de la grossesse, selon un suivi réalisé auprès de 119 femmes enceintes. Mais, surprise : le processus s'inverse rapidement durant les trois mois qui suivent l'accouchement. Pour la majorité de ces femmes, l'âge biologique diminue bien en deçà de l'âge du début de grossesse, jusqu'à huit ans selon les chercheurs. **C. G.**

SOURCE : HUNG PHAM, ÉCOLE DE MÉDECINE DE YALE, ÉTATS-UNIS.

Essai d'un traitement contre la surdité traumatique

OTOLOGIE Testée chez des cochons d'Inde, l'injection d'une petite molécule appelée AC102 au niveau de l'oreille interne a permis aux modèles animaux de recouvrer une audition presque normale après un traumatisme auditif. Le produit, mis au point par la société de biotechnologie allemande AudioCure Pharma, a empêché la mort programmée des cellules ciliées externes et l'altération des neurones auditifs provoquées par un bruit trop intense. Un essai clinique a été lancé pour confirmer chez l'humain ces résultats prometteurs. **P. K.**



LAURA W. WESSELDIJK ET AL.

Score polygénique de la capacité à marquer le rythme.

Beethoven était peu prédisposé à la musique

GÉNÉTIQUE À en croire son ADN, le compositeur Ludwig van Beethoven (1770-1827) Ludwig van Beethoven aurait dû être un mauvais musicien. C'est la conclusion d'une étude de génétique menée à partir d'une mèche de cheveu du compositeur. L'analyse de 69 séquences connues comme étant liées à la capacité de marquer le rythme montre que, théoriquement, 89 à 91 % de la population est génétiquement mieux pourvue que lui quant aux dispositions musicales. **C. G.**

SOURCE : LAURA WESSELDIJK, INSTITUT KAROLINSKA, SUÈDE.

EN DEUX MOTS

YEUX Le clignement des paupières permettrait d'augmenter la stimulation rétinienne, et donc la perception des images, selon une étude. **PSYCHIATRIE** Une substance hallucinogène sécrétée par le crapaud Colorado River Toad a montré des résultats prometteurs dans le traitement de la dépression. **MÉMOIRE** Une équipe américano-danoise a découvert que l'activité des neurones est si intense lors de la création d'un souvenir qu'elle cause des cassures dans leur ADN permettant de consolider la mémoire.

Pourquoi on naît gaucher ou droitier

La préférence pour la main gauche serait due à des variations aléatoires, sans influence génétique spécifique.

Le fait d'être gaucher serait loin de n'être qu'une affaire de génétique, selon l'Institut Max-Planck de psycholinguistique, à Nimègue (Pays-Bas). En étudiant des gènes rares retrouvés presque trois fois plus souvent chez les gauchers, les scientifiques en sont venus à privilégier un processus plutôt aléatoire. Il est certes probable que le fait d'être droitier *« soit le résultat par défaut du développement précoce du cerveau tel qu'il est codé par le génome »*, expose Clyde Francks, qui a dirigé l'étude publiée dans *Nature Communications*. Mais après examen du génome de 38 043 gauchers et 313 271 droitiers, *« nous pensons que la préférence pour la main gauche est simplement due à des variations aléatoires, sans influence génétique ou environnementale spécifique. Par exemple, des fluctuations dans les concentrations de certaines molécules au cours des étapes clés de la formation du cerveau. »* **C. G.**

VOISIN/PHANIE

10 % de la population écrit de la main gauche sans que les chercheurs puissent en établir clairement les raisons.

Découvrez

LA COLLECTION D'ESPRESSOS POUR TOUS VOS PLAISIRS CAFÉ

POUR DÉCOUVRIR NOS 30 VARIÉTÉS RENDEZ-VOUS SUR

ou lorespresso.fr

SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 30 BIS, RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE, 810 029 413 RCS PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157,70 EU ROS.

De splendides fresques dévoilées à Pompéi

Ces décors somptueux, inspirés de la guerre de Troie, ornaient une pièce de réception de 15 mètres de long.

PARCOARCHEOLOGICODIPOMPEI/AFP

Les personnages mythologiques Hélène et Pâris représentés sur l'une des fresques (détail).

Une imposante salle de banquet aux élégants murs noirs, décorés de sujets mythologiques inspirés de la guerre de Troie : c'est la dernière découverte saisissante dévoilée par le Parc archéologique de Pompéi (Italie). Preuve que la célèbre cité romaine ensevelie par les cendres volcaniques lors de l'éruption du Vésuve en l'an 79 n'a pas fini de révéler tous ses trésors. C'est au sein d'une luxueuse villa que ces décors somptueux ornaient la pièce de réception de 15 mètres de long sur six mètres de large. Ils ont été parfaitement préservés durant près de 2000 ans. Parmi les personnages représentés, se trouvent Hélène, femme du roi de Sparte Ménélas, et Pâris, le prince troyen qui enleva cette dernière — réputée être la plus belle femme du monde —, déclenchant la guerre de Troie. Sont également présents Cassandre, sœur de Pâris, et le dieu Apollon, de qui elle a reçu le don de dire l'avenir sans que ses prédictions ne soient jamais crues. Elle avertit notamment en vain ses compatriotes que le cheval offert par les Grecs est un subterfuge qui conduirait Troie à sa perte.

Un objet de réflexion sur le sens de l'existence

« *La présence fréquente de figures mythologiques sur les fresques dans les salles de réception des maisons romaines avait pour fonction de divertir les invités, en fournissant des sujets de conversation et de réflexion sur le sens de l'existence* », a expliqué la direction du site de Pompéi. Parmi les thèmes principaux de ces décors se retrouvent l'héroïsme, le destin et la façon dont les humains sont parfois en mesure de le faire tourner à leur avantage. Quant aux murs noirs de la pièce, « *ils permettaient que la fumée des lampes n'y soit pas visible,* a souligné le directeur du Parc archéologique Gabriel Zuchtriegel dans un communiqué. *Les convives s'y réunissaient après le coucher du soleil, et la lumière vacillante des lampes faisait bouger les images, surtout après quelques verres de bon vin de Campanie.* »

À ce jour, plus de 13 000 pièces dans 1070 unités résidentielles ont été dégagées. Mais un tiers du site de 22 hectares est encore enterré sous les cendres du Vésuve. ■ **H. J.**

8 Le nombre de couches de vernis sur « La Liberté guidant le peuple »

PATRIMOINE Le célèbre tableau peint par Eugène Delacroix en 1830 a été restauré et est à nouveau exposé au musée du Louvre, à Paris. Les restaurateurs ont révélé que huit couches de vernis recouvraient la toile depuis sa dernière restauration en 1949, ternissant les couleurs de la scène. Il peut désormais être admiré avec ses couleurs d'origine, superbes. **H. J.**

Des kangourous géants en Australie

PALÉONTOLOGIE
La découverte de plusieurs squelettes complets de kangourous autour du lac Callabonna, dans le sud de l'Australie, a permis de décrire trois nouvelles espèces de marsupiaux aujourd'hui disparues. L'une d'elles, baptisée *Protemnodon viator*, pesait jusqu'à 170 kg, soit le double du kangourou roux actuel. Ce qui ne l'empêchait pas de sauter de façon efficace grâce à ses très longues pattes. Il a vécu sur l'île-continent pendant 5 millions d'années avant de disparaître, il y a 40 000 ans, pour des raisons encore inconnues. **J. I.**

SOURCE : ISAAC KERR, UNIVERSITÉ FLINDERS, AUSTRALIE.

FLINDERS UNIVERSITY

Un squelette de « Protemnodon viator » mis au jour autour du lac Callabonna.

Japon | EXPO 2025

INCONTOURNABLE !

CROISIÈRE DE TOKYO A HONG KONG AVEC L'EXPOSITION UNIVERSELLE D'OSAKA

Le Japon, ses temples, ses geishas, le mont Fuji et… en 2025, **son exposition universelle à Osaka.** Sciences et Avenir – La Recherche ne pouvait pas manquer cette occasion d'inviter ses lecteurs – et beaucoup d'autres - à une croisière permettant à la fois de découvrir l'extraordinaire ville impériale de Tokyo, mais aussi de voguer le long des côtes de l'archipel, avant de mettre le cap vers la Chine.

Un voyage particulièrement remarquable proposé à bord du Regatta, un bateau luxueux et à taille humaine (333 cabines), dont les multiples escales ont de quoi faire rêver et réfléchir.

Osaka, Hiroshima (où l'on visitera le mémorial de la Paix), **Nagasaki, Shanghai** (où l'on restera pendant deux jours), **Hong Kong. Osaka** sera l'occasion unique de découvrir l'événement mondial réunissant 160 pays que constitue **l'exposition universelle.**

« Concevoir le futur, imaginer notre vie de demain », tel est son thème, particulièrement évocateur pour Sciences et Avenir – La Recherche et tous ceux qui se passionnent pour l'évolution actuelle de l'Asie.

En avant pour le pays du Soleil Levant !

Dominique LEGLU

NOS SCIENTIFIQUES, SPÉCIALISTES ÉMINENTS, PRÉSENTS (2) AVEC VOUS À BORD

Dr Dominique Leglu
Directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche, pôle Sciences du groupe Challenges.

Dr Francis Rocard
Astrophysicien, responsable du programme d'exploration du système solaire au CNES.

Mme Jozée Sarrazin
Spécialiste de l'Océan et des milieux sous-marins responsable du laboratoire environnement profond à l'Institut Français **Ifremer**.

A BORD DU LUXUEUX MS REGATTA *****
DU 20 MAI AU 03 JUIN 2025

15 JOURS / 14 NUITS
A PARTIR DE **7 190 €/PERSONNE** AU DÉPART DE PARIS
VOTRE PROGRAMME EN TOUT INCLUS (1)

UN ÉVÈNEMENT EXCLUSIF

MYCOMM.

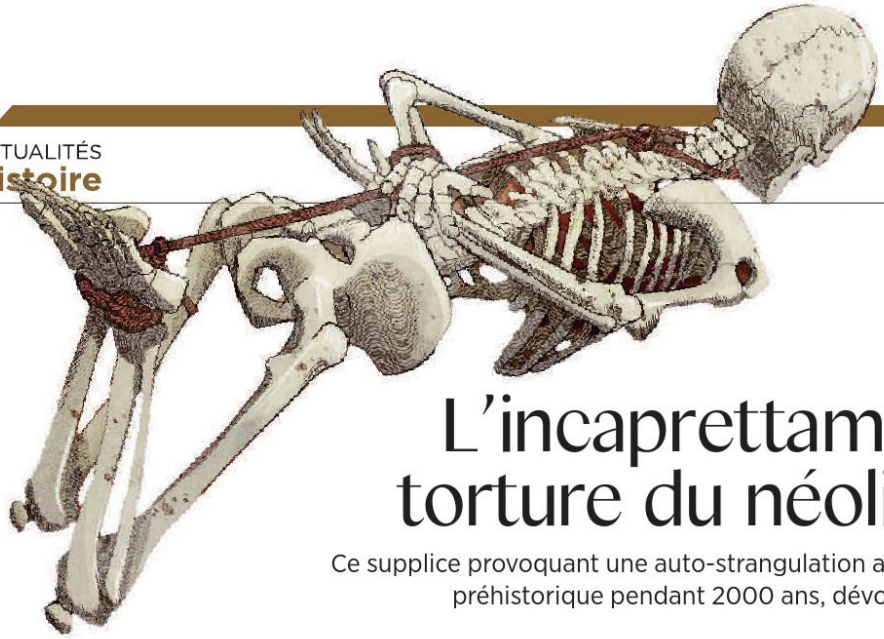
Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur
pavillonfranceosaka2025.mycomm.fr/sav
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | experiences@mycomm.fr

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

(1) Voir détails sur la brochure (2) Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

Graph. Atelier Pascale M (26). Montage photos : Toni - Takeshi Yu Unsplash - Volcan Fuji Freepik - Oceania Cruises



L'incaprettamento, torture du néolithique

Ce supplice provoquant une auto-strangulation a été utilisé dans l'Europe préhistorique pendant 2000 ans, dévoile une étude.

« *Ce rite cruel a été pratiqué durant près de 2000 ans dans une vaste zone allant de l'Europe de l'Est jusqu'au nord de l'Espagne* », révèle Éric Crubézy, chercheur à l'université de Toulouse-III Paul-Sabatier, qui vient de publier une étude dans *Science Advances* sur l'incaprettamento. Cette forme de torture consiste à allonger un sujet sur le ventre avec les genoux fléchis au maximum et à attacher une corde autour de son cou et de ses chevilles. La fatigue aidant, les jambes vont se détendre et mettre la corde sous tension, provoquant ainsi l'auto-strangulation de la victime. Après avoir documenté la pratique sur trois squelettes trouvés sur le site de Saint-Paul-Trois-Châteaux, dans la Drôme, l'équipe a pu mettre en évidence au moins 20 cas d'incaprettamento provenant de 14 sites en Europe. Tous se sont produits entre 5500 et 3500 ans avant notre ère. Après cela, on ne retrouve plus trace de cette pratique. ■ **J. I.**

N. SENEGAS, B. LUDES ET AL.

AURIMAGES/ AFP

À VOIR SUR LE NET

Exploration interactive des charges royales à la cour de Versailles

PROSOPOGRAPHIE Le centre de recherche du château de Versailles a mis en ligne la base de données Prosocour de tous les détenteurs des charges royales entre les règnes de Louis XIV et de Louis XVI. Près de 26 300 noms et plus de 2300 charges — du roi lui-même à l'accoucheuse de la Bastille — sont répertoriés. Une ressource extraordinaire à explorer. **A. D.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Un ichtyosaure grand comme une baleine

PALÉONTOLOGIE La découverte des restes de deux mâchoires sur des plages, dans le sud-ouest de l'Angleterre (Royaume-Uni), a permis de décrire une nouvelle espèce d'ichtyosaure, *Ichthyotitan severnensis*. Ce reptile marin géant, dont les restes sont datés de 202 millions d'années, possédait des mâchoires de 2 mètres de long pour un corps d'environ 25 mètres, soit les dimensions d'une baleine bleue. **J. I.**

SOURCE : DEAN LOMAX, UNIVERSITÉ DE BRISTOL, ROYAUME-UNI.

GABRIEL UGUETO

« Ichthyotitan severnensis » vivait au trias supérieur (illustration).

Des tubes de lave ont servi d'abris en Arabie

ANTHROPOLOGIE **Des outils en pierre et des poteries remontant à 7000 ans au moins ont été découverts dans un tube de lave du champ volcanique de Harrat Khaybar, au nord de Médine (Arabie saoudite). Première preuve que des humains se sont servis de ces tunnels formés lorsque la surface d'une rivière de lave refroidit tandis que la roche en fusion continue de couler en dessous.** **H. J.**

SOURCE : MATHEW STEWART, UNIVERSITÉ DE GRIFFITH, AUSTRALIE.

DIDIER RYKNER

Les couleurs du jubé médiéval n'ont pas été complètement effacées par le temps.

Les fragments du jubé de Notre-Dame de Paris enfin révélés

ARCHÉOLOGIE Dégagés en avril 2022 sous les dalles de Notre-Dame, les vestiges du jubé médiéval de la cathédrale ont enfin été présentés à la presse par l'Institut national d'archéologie préventive. En tout, 1035 fragments de cette grande clôture ornée séparant le chœur de la nef ont été retrouvés. Et d'autres reposeraient encore du côté du chœur. **H. J.**

L'« Excalibur espagnole » appartenait à un cavalier musulman

ARCHÉOLOGIE **Découverte en 1994 dans la vieille ville de Valence (Espagne), une très rare épée en fer de 46 centimètres a pu être datée avec quasi-certitude du Xe siècle de notre ère, lorsque la ville était sous domination islamique. Retrouvée fichée à la verticale dans une fosse, et surnommée ainsi « l'Excalibur espagnole », elle devait appartenir à un cavalier musulman, selon les experts du Service d'archéologie de Valence qui l'ont étudiée. S. de L.**

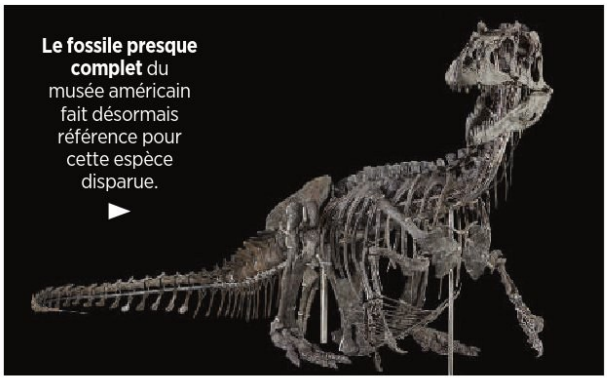
MIROSŁAW KUŹMA/MATTHIAS TOPLAK

Vue d'artiste d'une des trois femmes retrouvées dans une tombe en Suède.

Une étonnante élongation crânienne chez les Vikings

ANTHROPOLOGIE Mis au jour sur l'île suédoise de Gotland, en mer Baltique, les squelettes de trois femmes présentent une importante déformation au niveau du crâne. Une modification corporelle extrême qui n'avait encore jamais été observée dans la région scandinave à l'ère viking. **M. B.**

SOURCE : MATTHIAS TOPLAK, MUSÉE VIKING D'HAITHABU, ALLEMAGNE.



MIKE GAUDAUR, SMITHSONIAN INSTITUTION

Le fossile presque complet du musée américain fait désormais référence pour cette espèce disparue.

Un nouveau mètre étalon du terrible allosaure

PALÉONTOLOGIE Le squelette fossile de référence de l'allosaure vient de changer. C'est désormais celui conservé au Musée national d'histoire naturelle Smithsonian, à Washington (États-Unis), le plus complet connu, qui devient le spécimen type de l'espèce *Allosaurus fragilis*, un gros théropode carnivore qui vivait il y a 145 à 155 millions d'années en Amérique du Nord et en Europe. Il faut désormais vérifier que tous les dinosaures recensés comme appartenant à cette espèce lui correspondent vraiment. **J. I.**

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

RAYTANG/REX/REX/SIPA - NASA - WELLCOME COLLECTION, LONDRES - AFP

PHYSIQUE

Décès de Peter Higgs

Le physicien théoricien britannique Peter Higgs, prix Nobel 2013, est décédé le 8 avril. Il est à l'origine de l'une des plus grandes découvertes scientifiques de ce premier quart du XXIe siècle : le boson de Higgs, la particule qui donne sa masse à toutes les autres. Retrouvez l'entretien qu'il avait donné à *La Recherche* après l'attribution de son prix Nobel.
https://bit.ly/4dxjB4w

INTERNET

L'actu des sciences en ultrabrèves

Chaque jour, dès 17 heures, retrouvez sur le site de *Sciences et Avenir* les immanquables de l'actualité scientifique en format ultracourt. sciav.fr/928bref

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

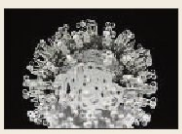
2 minutes

La Nasa va tester sa voile solaire

Propulsée par la lumière. C'est le principe de la voile solaire que s'apprête à tester l'agence spatiale américaine après le lancement réussi de la mission ACS3, à revivre en vidéo.
sciav.fr/928acs3

5 minutes

Les grandes épidémies en images



Découvrez dans ce diaporama l'exposition « Épidémies : Prendre soin du vivant », installée au musée des Confluences de Lyon jusqu'en février 2025.
sciav.fr/928diapo

10 minutes

Des additifs en cause dans le diabète

Une équipe d'épidémiologistes français est sur la piste d'une association probable entre des émulsifiants courants et le risque de diabète de type 2. Enquête.
sciav.fr/928diabet

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

F-V DONZÉ - L. TRUCHE -

La mine de chrome de Bulqizë, en Albanie, dans laquelle des chercheurs grenoblois ont découvert, à 1000 mètres de profondeur, la plus grande source d'hydrogène naturel au monde. Cette énergie « propre » pourrait être au cœur de la décarbonation de l'industrie.

Les promesses de l'hydrogène naturel

La découverte d'une source abondante en Albanie illustre l'engouement actuel autour de l'un des gaz clés de la transition énergétique. Les permis de prospecter se multiplient en Australie, aux États-Unis, en Europe, et plus particulièrement en France. L'estimation des réserves et le moyen d'y accéder décideront de l'avenir de la filière.

Par Fabrice Nicot

C'est un vaste jacuzzi bouillonnant de 30 mètres carrés sur 60 centimètres de profondeur, où l'on étouffe par 40 °C en toute saison. D'ailleurs, il n'y a pas de saisons à 1000 mètres de profondeur, dans cette mine de chrome située à Bulqizë, en Albanie. Les grosses bulles de gaz qui crèvent la surface du bassin sont constituées d'hydrogène (plus exactement du dihydrogène H_2) pur à 84 %. Selon une étude parue en février dans la revue *Science*, il s'agit du flux d'hydrogène naturel le plus important mesuré à ce jour dans le monde, *« 200 tonnes par an, et constant depuis au moins six ans »*, indique Laurent Truche, chercheur à l'Institut des sciences de la Terre à l'université Grenoble Alpes et coauteur de la publication. Cette découverte ne doit rien au hasard. Plusieurs facteurs ont fait de Bulqizë une candidate de choix pour y traquer l'hydrogène. *« Il y a déjà sa configuration : 1000 mètres de profondeur, c'est rare. Ensuite, nous savons qu'il s'est produit plusieurs explosions par le passé* [en 2011, 2017, 2023], *ce qui indique une migration de gaz, mais sans dire lequel. Enfin, elle se trouve sur un terrain géologique particulièrement propice à la formation d'hydrogène : des ophiolites. »*

Les ophiolites correspondent à un contexte géologique bien particulier où des fragments du man-

teau terrestre, la lithosphère océanique, ont été charriés sur la croûte continentale du fait de la tectonique des plaques. *« Normalement, les roches du manteau, très denses, plongent vers les profondeurs de la Terre au niveau des zones de subduction. Mais parfois, une combinaison de facteurs fait qu'elles sont hissées sur la plaque continentale lors d'un phénomène que l'on nomme obduction »*, précise le géologue. Ces roches du manteau sont principalement composées d'olivine et de pyroxène. Dès qu'elles entrent en contact avec l'eau, il s'engage une réaction chimique entre le fer ferreux (Fe^{2+}) de l'olivine et l'eau qui libère de l'hydrogène tout en produisant de la magnétite, et un phyllosilicate : la serpentine. D'où le nom de « serpentinisation » donnée à la réaction, désormais bien comprise, comme l'explique Laurent Truche. *« La serpentinisation a été largement étudiée en laboratoire depuis cinquante ans, ce qui permet d'être assez confiant sur ce mode de production de l'hydrogène naturel. Nous connaissons bien les réactions chimiques à l'œuvre, pour lesquelles la température est un facteur déterminant. La vitesse de réaction est maximale pour des températures comprises entre 200 et 350 °C. En deçà, elle diminue avec la température. L'une des pistes de la recherche actuelle consiste d'ailleurs à mesurer ces faibles vitesses qui pourraient être en jeu dans les ophiolites. »*

Le gaz s'est accumulé dans les vides de la roche endommagée

Dans le cas précis de Bulqizë, les chercheurs tentent ainsi de distinguer la part du flux d'hydrogène provenant de la réaction de serpentinisation et celle due à la libération d'un hydrogène plus ancien stocké dans la roche… À cette occasion, ils ont ainsi pu observer une configuration des lieux bien particulière. *« Il s'agit d'un réservoir de fracture,* détaille Laurent Truche. *Une zone de la roche endommagée, fracturée où le gaz s'est accumulé dans les vides. C'est assez singulier, on ne peut pas l'extrapoler. »* Quoi qu'il en soit, Bulqizë et ses 200 tonnes de flux annuelles viennent ainsi alimenter une actualité « bouillonnante » autour de ce que l'on nomme l'hydrogène « blanc » ou naturel. En quelques années, les permis de prospecter se sont multipliés aux États-Unis, en Australie, en Europe et singulièrement en France. Le dihydrogène, dont la combustion ne produit que de l'eau, peut être aussi utilisé dans les piles à combustible pour fabriquer de l'électricité en ne rejetant, là encore, que de l'eau. Il est ainsi au cœur de la décarbonation de l'industrie. Mais il en existe de plusieurs sortes, classées en fonction de leur production plus ou moins vertueuse pour l'environnement. Le pire et le moins cher est l'hydrogène « gris », obtenu à partir d'énergie fossile. On en trouve aussi du « vert » produit par l'électrolyse de l'eau grâce aux énergies renouvelables, ou encore du « bleu » fabriqué comme l'hydrogène gris, mais avec un captage des émissions de CO_2.

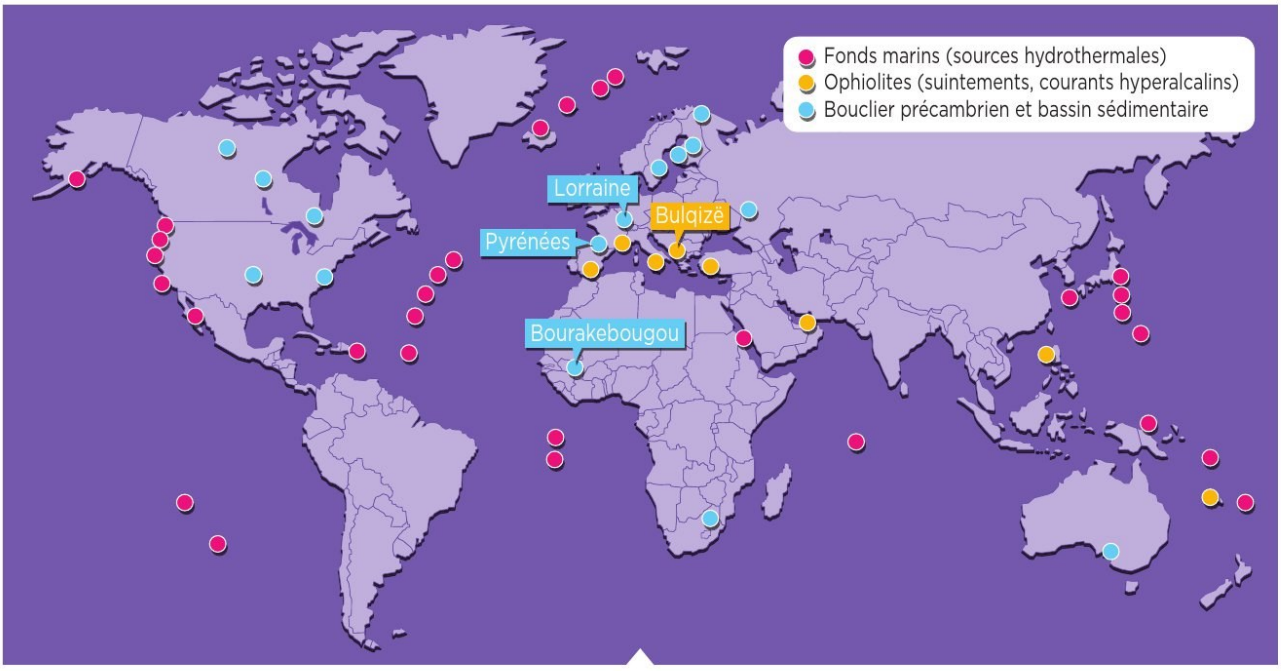
L'hydrogène blanc, le plus vertueux et le moins cher

Le plus vertueux serait l'hydrogène blanc, surtout s'il n'est associé à aucun autre gaz, comme c'est quasiment le cas à Bulqizë, ce qui évite les opérations de séparation. Il serait aussi le moins cher. *« Le prix communément admis par les acteurs de la filière est autour d'un euro le kilogramme, voire moins selon certains industriels très en pointe dans le domaine comme l'entreprise Koloma aux États-Unis qui descendent jusqu'à 0,50 euro,* selon Christophe Hecker, porte-parole de Terrensis, une start-up française lancée dans la prospection d'hydrogène naturel dans les Pyrénées (*lire l'encadré ci-contre*). *C'est six à huit fois moins cher que l'hydrogène vert. À ce tarif, cela*

PROSPECTION

Une entreprise française à l'assaut des Pyrénées

Le 3 décembre 2023, Terrensis, par l'intermédiaire de sa filiale TBH2 Aquitaine, obtenait le premier permis de recherche d'hydrogène et d'hélium accordé en France, pour une durée de cinq ans. Pour cette entreprise fondée en mars 2022, c'est le début d'une chasse au trésor dans les Pyrénées-Atlantiques sur une superficie de 225 km^2, comme le détaille son porte-parole Christophe Hecker. *« La première étape consiste à cartographier le sous-sol, notamment grâce à des campagnes d'acquisition de données sismiques, en émettant des vibrations en surface par exemple. En fonction de la vitesse avec laquelle les ondes nous reviennent, nous saurons s'il y a des réservoirs, des pièges géologiques où l'hydrogène se serait accumulé à l'aplomb du site. En sondant plus profondément, nous espérons trouver une "cuisine", autrement dit un système générateur où l'hydrogène se fabrique en direct. Lorsque nous l'aurons détecté, il nous faudra solliciter une nouvelle autorisation afin de réaliser un forage test pour mesurer le débit et la qualité du gaz. »* Terrensis a ainsi levé environ 2 millions d'euros, auprès d'investisseurs privés essentiellement. Signalons aussi l'entreprise 45-8 Energy, implantée à Metz (Moselle), qui prospecte dans toute l'Europe à la recherche d'hydrogène couplé à de l'hélium, autre gaz d'intérêt industriel.



BRUNO BOURGEOIS

Les gisements d'hydrogène naturel dans le monde proviennent de trois principaux types de sources, avec diverses méthodes d'extraction.

change la donne. Si demain nous sommes capables de proposer aux industriels des quantités conséquentes d'hydrogène naturel, la demande pourrait exploser et dynamiser toute la filière. »

Ce prix laisse toutefois perplexe les experts. Car pour l'heure, personne ne gagne de l'argent avec l'hydrogène blanc. Le seul endroit au monde où il est exploité est un petit village du Mali, Bourakebougou. Depuis 2012, il jaillit d'un puits et alimente une minicentrale électrique gérée par l'entreprise canadienne Hydroma. Il fournit de l'électricité pour éclairer quelques maisons grâce à un moteur à combustion fonctionnant avec l'hydrogène du forage. C'est peu, mais cela sert de démonstrateur pour toute la filière. Qui attend toujours de se mettre en place.

La présence d'hydrogène est pourtant attestée en de nombreux endroits du globe, comme l'illustre notre carte non exhaustive *(ci-dessus)*. Elle résulte de différents mécanismes de production, les deux principaux étant la serpentinisation et la radiolyse de l'eau (décomposition de la molécule sous l'effet d'un rayonnement énergétique). Cette diversité ne facilite pas l'estimation des réserves. Dans le cas des ophiolites, *« la problématique des réserves est très différente du pétrole ou du gaz naturel qui sont stockés dans des bassins sédimentaires, bien plus vastes que les ophiolites,* analyse Laurent Truche. *Ensuite, les roches-réservoirs de ces bassins sont davantage poreuses que les ophiolites. On ne pourra donc pas trouver de réservoirs aussi grands que ceux que l'on a découverts pour le gaz naturel au Qatar, en Arabie saoudite, en Iran, simplement pour des basses considérations géologiques de taille et de porosité.* » Néanmoins, il existerait un espoir dans le cas d'ophiolites situées très en profondeur, jusqu'à 10 kilomètres. *« Des roches sédimentaires recouvrant ces ophiolites pourraient piéger le gaz qu'elles produisent. Nous retrouverions alors un système comparable aux champs pétrolifères. Cela pourrait être le cas dans les Pyrénées, par exemple.* »

Un autre espoir a jailli récemment en Lorraine, sur le site de l'ancien bassin minier. En utilisant des puits autrefois dévolus à l'exploitation du charbon, des chercheurs sont parvenus à mesurer la teneur en hydrogène dissous dans les aquifères, la couche souterraine de roches perméables à l'eau. Cela constitue une première scientifique, comme

UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

> « La problématique des réserves est très différente du pétrole ou du gaz naturel, stockés dans des bassins bien plus vastes que les ophiolites »
>
> **Laurent Truche** chercheur à l'Institut des sciences de la Terre, à l'université Grenoble Alpes

SOLEXPERTS

C'est en cherchant du méthane en Lorraine qu'une équipe a découvert un important gisement d'hydrogène, en sondant la concentration de gaz dissous dans l'aquifère.

l'explique Jacques Pironon, directeur du laboratoire GeoRessources à Nancy. *« Nous avons mis au point une sonde, SysMog, capable de mesurer la concentration des gaz dissous dans l'eau de l'aquifère. Ainsi, il a été possible de mettre en évidence une augmentation continue et linéaire de la proportion de dihydrogène avec la profondeur. À 1250 mètres, notre point le plus bas, 20 % du gaz dissout est du dihydrogène, 75 % du méthane, et 5 % de l'azote. C'est la première fois qu'un tel profil est établi. D'habitude, nous ne disposons que de mesures parcellaires, faites non loin de la surface. »* Ces données ont permis aux chercheurs de faire une estimation de la ressource totale, à partir d'une extrapolation sur l'ensemble du bassin. *« En se limitant à une profondeur de 3 kilomètres, nous estimons qu'il y aurait 36 millions de tonnes d'hydrogène sur le bassin lorrain »*, avance Jacques Pironon.

Un chiffre conséquent, sachant que l'association Hydrogen Europe estime à 8,2 millions de tonnes la quantité d'hydrogène consommée sur le Vieux Continent en 2022. Mais attention, *« c'est une estimation de la ressource globale, qu'il ne faut pas confondre avec la réserve qui est ce que l'on pourra effectivement récupérer en mettant au point des méthodes d'extraction »*, précise Jacques Pironon. Il n'y a pas d'ophiolites dans le bassin lorrain, l'origine de ce gaz est donc différente. Deux mécanismes sont évoqués. Des réactions chimiques se produiraient entre l'eau et des ions fer contenus dans les roches carbonifères (datant d'environ 300 millions d'années) constituant le sous-sol de la région. L'équipe de GeoRessources a également montré en laboratoire que le charbon porté à haute température en présence d'eau peut se transformer en méthane et en hydrogène. *« Nous ne sommes pas encore capables de trancher entre ces deux options »*, regrette Jacques Pironon. La question est cruciale car le mécanisme de production de l'hydrogène pose la question de son caractère renouvelable ou non. *« Si c'est le charbon, alors ce n'est pas renouvelable car la transformation en hydrogène prend des millions d'années, comme pour le pétrole. En revanche, dans le cas d'une réaction chimique entre les ions fer et l'eau, nous avons montré que les échelles de temps allaient de la semaine au mois. C'est très rapide. »*

C'est un peu comme attraper des bulles de champagne

Ce résultat lorrain rebat un peu les cartes, alors que jusqu'à présent la prospection privilégiait les ophiolites. Ainsi, en mars 2023, la société Française de l'énergie a déposé une demande de recherche et d'exploitation d'hydrogène naturel en Lorraine. En association avec GeoRessources, elle va tenter de mettre au point une méthode d'extraction de l'hydrogène dissout dans les aquifères. *« C'est un peu comme attraper des bulles de champagne,* s'amuse Jacques Pironon. *Notre objectif est d'aller chercher le gaz dissout en profondeur, et non d'apporter l'eau en surface pour la traiter, afin d'avoir le moins d'impact possible sur l'environnement. »* L'équipe se donne trois ans pour parvenir à une preuve de concept. Et offrir ainsi, peut-être, un second âge d'or au bassin lorrain, soixante ans après la fermeture des mines de charbons et de fer. ■

IFPEN

VERBATIM

YANNICK PEYSSON RESPONSABLE DU PROGRAMME RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT « NOUVELLES RESSOURCES DU SOUS-SOL » AU SEIN DE L'IIFP ÉNERGIES NOUVELLES

« Estimer les ressources est encore difficile »

« Quasiment inexistant il y a quinze ans, l'hydrogène blanc est devenu un thème majeur de la transition énergétique en quelques années. Il est désormais acquis que le sous-sol en est riche, et nous connaissons mieux les mécanismes de production. Mais estimer les ressources est encore difficile, notamment parce que la physique du comportement de l'hydrogène dans le sous-sol est incomplète. Si bien qu'il est impossible de dire si demain l'hydrogène blanc représentera une part marginale ou majeure dans le mix énergétique. Mais des indices montrent que lorsqu'il est présent quelque part, il l'est en grande quantité. C'est un argument pour penser qu'il pourrait être bon marché. Néanmoins, une production mondiale conséquente ne verra pas le jour avant une dizaine d'années. D'ici là, nous aurons besoin d'autres sources pour la transition énergétique, notamment d'hydrogène vert. »

25 SCIENTIFIQUES
PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

Ariane 6 enfin parée au décollage

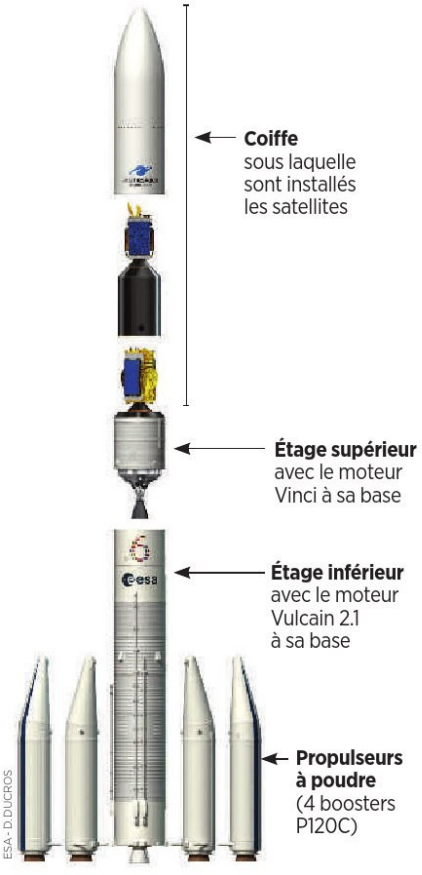
Sous pression de la concurrence de SpaceX, l'Europe tente de reprendre la main avec ce lanceur lourd qui doit réaliser son vol inaugural dans quelques semaines. Retour sur les défis technologiques de la conception du successeur d'Ariane 5.

Une nouvelle page de l'histoire spatiale européenne devrait s'écrire dans les prochaines semaines : le lanceur Ariane 6 va en effet réaliser son vol inaugural dans une fenêtre de tir qui s'étend de mi-juin à fin juillet. Pour cette première mission initialement prévue en 2020, la fusée de 62 mètres de haut devra mettre en orbite un ensemble de satellites de démonstration et faire montre de capacités de manœuvre inédites en orbite. Le premier vol d'Ariane 6 est très attendu : l'Europe ne dispose plus de lanceur depuis le dernier vol d'Ariane 5, en juillet 2023, et l'échec du premier vol commercial de la nouvelle fusée italienne Vega-C en 2022. Ariane 6 devra ainsi remplir les missions effectuées précédemment par le lanceur lourd Ariane 5 et par Soyouz, une fusée russe de moyenne puissance lancée depuis Kourou entre 2014 et 2022, date de la rupture diplomatique avec Moscou.

Pendant vingt-sept ans, Ariane 5 s'est avérée être l'une des fusées les plus fiables du marché commercial, qu'elle a longtemps dominé. Mais au tournant des années 2010, l'américain SpaceX a changé la donne avec son Falcon 9 réutilisable. Il a alors instauré une âpre concurrence, en proposant notamment des prix de lancement inférieurs à ceux d'Arianespace, la société chargée de la commercialisation des lanceurs européens. Outre l'avantage acquis à partir de 2017 par la réutilisation de ses lanceurs, SpaceX a réduit ses coûts en fabriquant en interne la majorité des composants et en automatisant certaines étapes de sa chaîne de production. Une forme d'industrialisation, quand la fabrication d'Ariane 5 tenait plus de l'orfèvrerie. Alarmés, les Européens lancent dès 2012 les premières études pour définir l'après-Ariane 5, avec pour objectif de diminuer les coûts d'au moins 40 %. Et en 2014, décision est prise de développer Ariane 6, qui se déclinera en deux versions : A62 et A64, avec respectivement deux et quatre propulseurs d'appoint. La première pour remplacer Soyouz, la seconde Ariane 5, ce qui permettra de mettre en orbite de transfert géostationnaire des satellites de 5 à 11,5 tonnes.

Pour réduire temps et coûts de développement, les ingénieurs ont opté pour l'utilisation de technologies sur l'étagère et la mutualisation des nouveaux développements. Ainsi, l'étage inférieur à ergols cryogéniques (oxygène et hydrogène liquides) et son moteur Vulcain 2.1 sont hérités d'Ariane 5, tandis que les boosters de 142 tonnes de pro-

La version A64 du nouveau lanceur



ESA - D.DUCROS

ESA - D. DUCROS

A62, la version « légère » d'Ariane 6 (dotée de deux propulseurs), effectuera cet été le vol inaugural du nouveau lanceur européen (vue d'artiste).

pergol solide chacun (les P120C) sont aussi utilisés comme premier étage du lanceur léger européen Vega-C. L'étage supérieur, en revanche, comprend plusieurs innovations, dont le moteur réallumable Vinci, ainsi que l'APU (Auxiliary Power Unit), un dispositif qui assure la pressurisation des réservoirs — et donc l'allègement de l'étage — et des impulsions de faible poussée.

Avec ses deux boosters, le lanceur inaugural testera la version « légère » d'Ariane 6. Si tout se passe comme prévu, l'énergie initiale du vol fournie essentiellement par les moteurs latéraux P120C, d'une poussée maximale de 400 tonnes chacun au décollage. Après 2 minutes de vol, les boosters se sépareront de l'étage principal, qui continuera pendant encore six minutes à assurer la propulsion avec son moteur cryogénique Vulcain, d'une puissance de 135 tonnes dans le vide. À 160 km d'altitude, l'étage inférieur se séparera et retombera dans l'atmosphère, tandis que le moteur Vinci s'allumera pour prendre le relais pendant douze minutes hors de l'atmosphère. Il va ensuite pouvoir se rallumer jusqu'à trois fois pour fournir des poussées ponctuelles de 18 tonnes afin de déployer les charges utiles sur des orbites différentes, tandis que les petites corrections de trajectoire du moteur APU, qui peut fonctionner pendant plus d'une heure, autoriseront des manœuvres complexes, avec ou sans Vinci. Autant d'atouts cruciaux pour déployer efficacement des constellations de satellites, un marché en plein essor.

Un ordinateur de bord, cerveau de l'étage supérieur

« *Pour ce premier vol, il faudra ainsi vingt-cinq minutes avant la séparation des charges utiles,* résume François Deneu, directeur du programme Ariane 6 chez ArianeGroup. *La seconde partie du vol est très importante pour démontrer les capacités du lanceur, soit une parfaite maîtrise des manœuvres en orbite. Ariane 6 devra assurer plus de missions qu'Ariane 5 grâce à cet étage supérieur. Ses deux systèmes propulsifs augmentent la complexité d'utilisation, qui est gérée par un ordinateur de vol, le cerveau de l'étage supérieur. Cela s'est avéré plus compliqué que prévu,* reconnaît François Deneu, *ce qui explique les retards. Mais ce lanceur sera ainsi plus adapté aux nouveaux marchés.* » Pour ce premier vol, il sera équipé d'environ 1000 capteurs et caméras vidéo, en vue d'analyser son comportement. La coiffe a un diamètre de 5,4 mètres pour 14 à 20 mètres de haut. « *Cela correspond à un bus RATP, où peuvent se loger un gros satellite ou une multitude de charges utiles,* explique Gilles Debas, chef de projet Ariane 6 chez ArianeGroup. *Ce lanceur est conçu pour être très polyvalent et atteindre les orbites basse, héliosynchrone ou de transfert géostationnaire.* » Selon François Deneu, Ariane 6 devrait ensuite évoluer : l'ajout d'une tonne de poudre dans chaque booster augmentera sa poussée pour embarquer plus de satellites. Arianespace dispose déjà d'un carnet de commandes de 28 missions, qui seront réalisées au rythme de neuf à 12 lancements par an. Réduire les coûts passait aussi par la refonte du processus de fabrication. En janvier, *Sciences et Avenir* assistait aux ultimes

PROJETS

Vers une coiffe habitable

Le lanceur Ariane 6 servira-t-il demain à la desserte de la Station spatiale internationale (ISS) et, à terme, à celle de la Lune ? C'est en tout cas l'objectif qui se dessine derrière l'appel à propositions lancé en novembre par l'Agence spatiale européenne (ESA). Celui-ci vise à développer *« un service de retour de fret depuis l'espace, l'objectif étant de confier à un prestataire commercial européen, d'ici à 2028, l'approvisionnement de l'ISS »*, indique l'agence. L'ESA envisage même de faire évoluer le vaisseau vers une version habitable pour embarquer des astronautes vers d'autres destinations potentielles. Industries du spatial, start-up, universités, centres de recherche : tout le monde peut concourir pour cette première phase à l'issue de laquelle jusqu'à trois projets seront sélectionnés, lors du prochain conseil interministériel de l'ESA, en 2025. Plusieurs concepts existent déjà dans les cartons des industriels : citons les vaisseaux Nyx de la start-up

ARIANEGROUP

Susie est le projet conçu par ArianeGroup de dernier étage de fusée réutilisable (vue d'artiste).

The Exploration Company, Susie d'ArianeGroup *(lire* S. et A. *n° 924, p. 10)*, dont le design est optimisé pour constituer le dernier étage d'Ariane 6, ou encore Rev-1, un projet conjoint de Thales Alenia Space et Space Cargo Unlimited conçu pour fournir *« la première usine flottante de l'espace »*.

tests sur l'étage principal, dans la nouvelle usine des Mureaux, dans les Yvelines. *« Cela fait cinquante ans que l'on intègre les lanceurs à la verticale,* soulignait François Deneu. *Désormais, notre nouvelle ligne de production le fait à l'horizontale, avec de nouvelles problématiques à gérer. »* Cette option, inspirée des lignes d'assemblage aéronautiques, permettra d'augmenter les cadences de fabrication. Depuis la passerelle métallique en surplomb, nous découvrions un espace industriel de 22 000 m² d'outillages connectés, de robots automatisés et de processus numérisés. Les plaques d'alliage d'aluminium sont solidarisées par de gigantesques machines à souder, les plus grandes d'Europe. Après un test de pression pour vérifier l'étanchéité des structures, le réservoir du premier étage est décapé au laser pour éliminer toute trace d'oxydation, avant d'être recouvert d'une mousse isolante projetée. *« L'hydrogène doit être conservé à -150 °C et l'oxygène à -180 °C,* nous expliquait François Deneu. *Sachant que les réservoirs vont demeurer des heures durant sur le pas de tir, sous le soleil de Guyane, leur protection est cruciale pour éviter l'évaporation. »*

ARIANEGROUP / ADRIEN DASTE

« Ce lanceur est conçu pour être très polyvalent et atteindre les orbites basse, héliosynchrone ou de transfert géostationnaire »

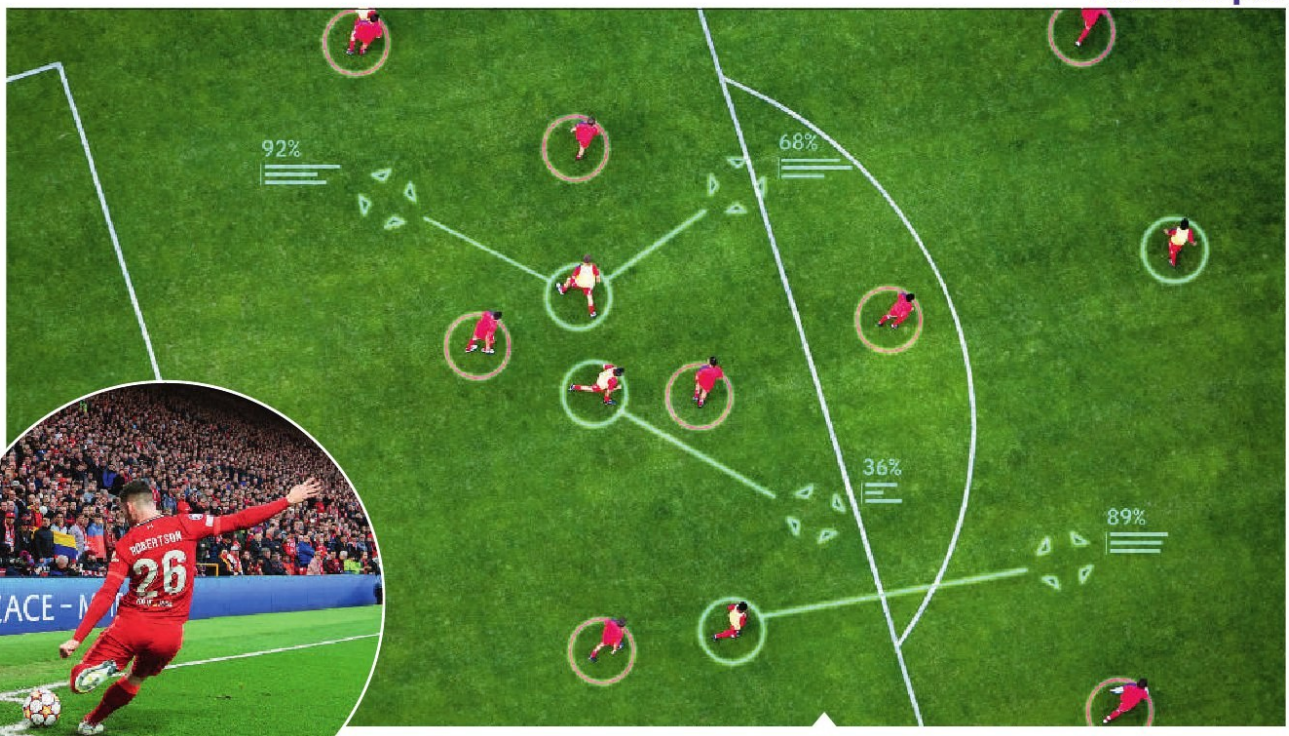
Gilles Debas, chef de projet Ariane 6 chez ArianeGroup

Les éléments de la fusée ont rejoint Kourou en février

Parvenu à l'ultime station de la ligne de production, le premier étage a été mis en conteneur et transporté par barge sur la Seine jusqu'au Havre. De là, il a été transféré à bord du *Canopée*, premier cargo hybride à voiles au monde. Le navire flambant neuf de 121 mètres de long avait préalablement embarqué l'étage supérieur à Brême, la ville allemande où il est fabriqué, et divers éléments — dont la coiffe en composites produite en Suisse — dans le port néerlandais de Rotterdam. Après une ultime escale à Bordeaux pour compléter le chargement avec les boosters, produits localement, et les éléments assemblés à Madrid, le *Canopée* a mis le cap vers la Guyane. Les éléments du vol inaugural ont ainsi rejoint Kourou le 21 février et ont été intégrés à quelques encâblures du pas de tir.

Ce vol de qualification est considéré comme à haut risque : en 1996, le premier vol d'Ariane 5 s'était soldé par un échec… Quoi qu'il en soit, l'Agence spatiale européenne prépare déjà l'après-Ariane 6 dans le cadre du programme Ariane Next. À cette fin, les prototypes d'étage réutilisable Callisto et Themis et le nouveau moteur Prometheus imprimé en 3D sont en développement. Sous pression, l'Europe tente de reprendre la main. ■

Sylvie Rouat



GOOGLE DEEPMIND - SIMON STACPOOLE / OFFSIDE / PRESSE SPORTS

TacticAI a été développé sur la base de 7176 corners tirés par les joueurs du Liverpool FC (en médaillon, Andrew Robertson) afin d'établir la meilleure combinaison possible.

L'algorithme, champion du corner

À l'heure où s'ouvre le championnat d'Europe de football, retour sur une intelligence artificielle développée par Google qui promet d'augmenter les chances de marquer sur corner. Signe du rôle de plus en plus important de ses outils sur le terrain.

Pour réussir un corner, il faut : du talent, bien connaître son adversaire, un peu de chance… et l'aide de l'intelligence artificielle (IA). C'est en tout cas le pari qu'a fait Google, en testant son algorithme avec le Liverpool Football Club, au Royaume-Uni. Lors d'un match, un corner — ou « coup de pied de coin » — est accordé à une équipe lorsque le ballon sort du terrain derrière la ligne de but et qu'il a été touché par un joueur de l'autre équipe opérant en défense. Tiré à l'arrêt depuis l'angle du terrain, il représente une opportunité précieuse de marquer un but puisque le ballon est généralement envoyé dans la surface de réparation, devant la cage, où les deux équipes bataillent pour le récupérer. Cette phase de jeu est ainsi l'occasion pour les deux équipes d'éprouver les stratégies testées à l'entraînement, en essayant d'anticiper ce que va faire l'adversaire.

C'est dans cette optique que Deepmind, l'équipe de recherche en intelligence artificielle de Google, a mis au point un outil, TacticAI, sur la base de

ARBITRAGE

Quand l'assistance vidéo a les yeux partout

Utilisée dans les stades depuis 2017, l'assistance vidéo à l'arbitrage ou VAR (Video Assistant Referees) permet de regarder des images au ralenti pour mieux arbitrer certaines situations de jeu. Depuis la coupe du monde de football au Qatar en 2022, elle est devenue « semi-automatique » grâce aux algorithmes afin de détecter les hors-jeu. Un capteur placé dans le ballon permet de suivre son accélération. Il envoie environ 500 données par seconde au logiciel de la VAR, ce qui permet de savoir quand il est joué ou non. En parallèle, une douzaine de caméras spécialisées, placées sur le toit du stade, suivent 29 points corporels différents par joueur afin de détecter des positions non réglementaires. Une technologie encore plus poussée pour l'Euro 2024 grâce à la Connected ball 2.0. Cette balle de nouvelle génération pourra, en plus d'être géolocalisée, détecter les contacts du joueur avec le cuir grâce à des capteurs tactiles d'une précision de 2 millimètres. Cette fois, la VAR ne se cantonnera pas à aider la prise de décision sur les hors-jeu. L'UEFA a annoncé que ce ballon ultramoderne, capable de repérer les zones du corps touchées par le ballon, aidera aussi à prendre des décisions lors de litiges sur les mains.

7176 corners joués en attaque par le Liverpool FC. Pour chacun des corners étudiés, le programme formule des recommandations sur le placement des joueurs et la meilleure combinaison face au but de l'adversaire pour essayer de marquer. L'IA peut aussi prédire quel joueur a le plus de chances de toucher la balle en premier et si un tir va être tenté ou non. Chaque scénario de corner (le receveur va-t-il mettre un but ? Un joueur adverse va-t-il intercepter la balle ?) est ainsi converti en graphe.

Les graphes ont ensuite été présentés à cinq membres du club : trois data analysts (qui exploitent les données du club), un analyste vidéo et un assistant de l'entraîneur. *« Le Liverpool FC possède déjà une solide équipe dédiée aux statistiques depuis de nombreuses années, avec un grand nombre de personnes spécialisées en Stem* [Science, technology, engineering, and mathematics] *et elles étaient très enthousiastes à l'idée de ce projet »*, raconte Petar Velickovic, chercheur au sein de l'équipe DeepMind et coauteur de l'article publié dans la revue *Nature Communications* sur TacticAI. Ces cinq membres du club ont dû passer en revue une série de différentes configurations de corners, certaines correspondant à des cas réels rencontrés dans le club, d'autres étant générées par l'algorithme. *« Les experts n'ont, en général, pas réussi à différencier un véritable corner d'un autre généré par IA. Ils avaient tendance à définir toutes les configurations comme réelles, qu'elles viennent de l'IA ou non »*, explique Petar Velickovic. Ils ont, en plus, favorisé les scénarios proposés par l'IA face à ceux du club dans 90 % des cas. En revanche, difficile de prédire avec certitude ce qui peut se passer en jeu ouvert, lors des offensives d'une équipe notamment. Plus l'horizon de prédiction est lointain et moins le système est fiable.

MATHIEU LACOME

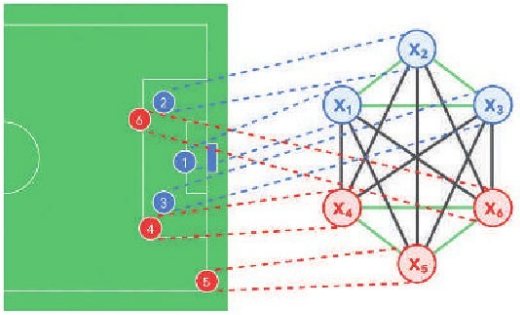
« Les grands modèles d'algorithmes peuvent analyser finement le jeu d'un adversaire à froid »

Mathieu Lacome, directeur de la performance au club de Parma Calcio, en Italie

Première mission de l'IA : prédire les blessures

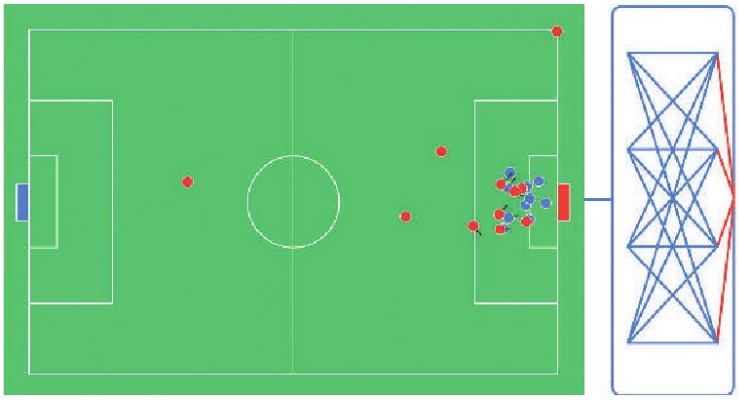
À chaud, l'IA n'est encore qu'à l'état de test. *« Pour le moment, les algorithmes ne sont pas utilisés en direct par les entraîneurs lors des rencontres sportives. En revanche, ils font intégralement partie de la vie de l'équipe et des entraînements »*, explique Martin Buchheit, consultant en performance, recherche et analyses. L'IA s'est déjà taillé une place pour toutes les décisions à tête reposée. *« Les grands modèles d'algorithmes peuvent analyser finement le jeu d'un adversaire à froid, en dehors des gros matchs, afin d'identifier des modèles de jeu qu'on peut alors présenter à l'entraîneur »*, abonde Mathieu Lacome, directeur de la performance au club de Parma Calcio en Italie, anciennement chef de la recherche et de l'innovation au Paris Saint-Germain.

Au cœur du modèle de jeu : la composition des équipes. Pour maximiser ses chances de gagner un match, il faut des joueurs en forme et en bonne santé. C'est là la première mission des algorithmes : prédire les blessures. *« Dans tous les clubs, les joueurs répondent à un questionnaire chaque jour. Ont-ils*



Toutes les éventualités en un graphe

L'algorithme TacticAI crée des diagrammes (à droite) des interactions possibles des joueurs (à gauche), en intégrant leurs caractéristiques physiques et techniques.



GOOGLE DEEPMIND

La combinaison gagnante

En situation réelle, l'algorithme prend en compte la position des 22 joueurs (attaque en rouge, défense en bleu) pour estimer qui recevra le ballon, la probabilité de tirer au but et comment positionner les joueurs pour maximiser les chances de tir.

bien dormi ? Se sentent-ils courbaturés ou fatigués ? », explique Martin Buchheit. Ces facteurs de bien-être sont couplés à des données de santé — comme les prises de sang, la fréquence cardiaque — ainsi qu'à la charge d'entraînement et aux distances parcourues. « *Selon le résultat, on voit sur quel facteur on peut jouer, comme allonger le temps de récupération du footballeur lorsque c'est possible, ou carrément ne pas le faire jouer.* » Car avant chaque rencontre, les équipes sont inondées de chiffres. Elles savent très précisément quelles sont leurs chances de battre leur adversaire. Les résultats de leurs précédentes rencontres, ajoutés à la performance de chaque équipe durant la saison, leur donnent un indicateur pour le prochain match. « *Quand les prédictions sont mauvaises, on fait évidemment tout ce qu'on peut pour essayer de faire mentir les chiffres* », confie Martin Buchheit. Certains événements, comme l'arrivée d'un nouvel entraîneur très prisé, permettent par exemple de redonner un nouveau souffle à l'équipe. « *Ces coachs ont une valeur individuelle dans le modèle d'algorithme. Partout où ils passent, les équipes finissent toujours un peu au-dessus de ce qui était prévu.* » Une plus-value qui modifie toute la dynamique de la saison.

Enfin, les clubs usent aussi largement de ces programmes dans l'ombre, afin de choisir leurs nouvelles recrues. À chaque processus de recrutement, des modèles algorithmiques sont au cœur des négociations. « *On parle là de "gros sous". Les clubs possèdent déjà des départements dédiés à calculer si un transfert d'une équipe à l'autre pourrait améliorer la performance du club. Avant chaque signature, des documents complexes sont produits,* explique Mathieu Lacome. *Ceci dit, ça n'enlèvera jamais le besoin de bien connaître la mentalité, l'environnement et la famille d'un joueur.* » L'intelligence artificielle a beau s'être imposée dans la plupart des clubs, les entraîneurs ne sont pas près de raccrocher les crampons. « *Un assistant virtuel ne remplacera jamais un entraîneur,* tempère Mathieu Lacome. *Certes, nous pouvons mesurer plein d'éléments, les passes réussies, les facteurs physiques lorsque les joueurs courent, etc. Mais il y a aussi beaucoup de choses qu'on ne peut pas chiffrer, telles que l'impact d'un joueur sur un autre, un joueur dans une mauvaise passe car il est en train de changer d'agent, un autre avec des problèmes familiaux, etc.* » Il incombe toujours au coach d'avoir le flair pour ces choses-là.

Des prédictions limitées par le jeu sur le terrain

À l'inverse, les modèles ont aussi pour limite l'imagination et la spontanéité des footballeurs sur le terrain. « *À chaque match, il se passe des choses auxquelles personne ne s'attendait. Un joueur qui ne marque jamais récupère une balle avec le mauvais côté du pied, il frappe et réussit à mettre un point. Cela peut retourner la situation. Comme les matchs de foot se jouent à un but près, il suffit d'une fulgurance. Au contraire du basket ou du handball, par exemple* », ajoute Martin Buchheit. Et pourtant, Google espère réussir à aller plus loin que la prédiction des tendances avant un match, et faire partie intégrante des stratégies de jeu. « *Les logiciels comme TacticAI pourraient, à l'avenir, faire partie de la "boîte à outils" des clubs. Sauf que celui-là permet de réfléchir aux mouvements de joueurs de façon plus abstraite* », suggère Petar Velickovic. Qui doit se placer où, à qui doit-il faire la passe, vers où doit-il mener le ballon ? Reste à convaincre les entraîneurs d'emporter la boîte noire des algorithmes jusque sur le banc de touche. ■

Coralie Lemke

ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

L'IA se prépare pour aller à la guerre

Le gouvernement français a dévoilé un ambitieux programme d'intelligence artificielle de défense. Avec le risque que l'armée dépende de plus en plus des machines pour engager ses troupes et son matériel.

« *Les armées doivent prendre le virage de l'intelligence artificielle!* », lançait le ministre des Armées Sébastien Lecornu le 8 mars à l'École polytechnique, annonçant la création d'une nouvelle Agence ministérielle pour l'IA de défense (Amiad). Son but : renforcer les équipements de l'armée (avions Rafale et canons Caesar, entre autres) et aider les états-majors dans la planification d'opérations, notamment grâce à un supercalculateur classifié, le premier en Europe selon le ministère. « *La France est en train de faire un effort important dans le domaine de l'IA de défense* », estime Lance Hunter, professeur de relations internationales à l'université d'Augusta (États-Unis), spécialiste de l'utilisation de l'IA par les armées des grandes puissances militaires. Avec un budget de 300 millions d'euros par an (pour un total de 2 milliards d'ici à 2030), le pays ambitionne d'entrer dans le top 3 mondial de l'IA militaire.

2 milliards d'euros
Le budget consacré à la nouvelle Agence ministérielle pour l'IA de défense (Amiad) d'ici à 2030.

Ailleurs aussi, les armées recourent de plus en plus à ces technologies. « *Les États-Unis disposent par exemple de systèmes qui simulent une frappe de missile et estiment les dommages collatéraux pour aider à prendre des*

MICHAEL MAYER

> « L'humain pourrait devenir le maillon faible dans la boucle de prise de décisions militaires »
>
> **Michael Mayer,** conseiller à l'Institut de recherche de la Défense norvégienne (FFI)

décisions », révèle Michael Mayer, conseiller à l'Institut de recherche de la Défense norvégienne (FFI). Et il est probable que cette utilisation gagne en importance. « *Certains experts estiment que dans le futur, le nombre de missiles et de drones présents en même temps dans l'espace de la bataille sera tellement élevé qu'il dépassera les capacités de la cognition humaine. Un humain ne pourra plus faire les arbitrages nécessaires à temps et devra déléguer cette responsabilité à la machine,* poursuit Michael Mayer. *L'humain pourrait devenir le maillon faible dans la boucle de prise de décisions militaires.* » Une situation connue sous le nom d'hyperguerre (*hyperwar*), où l'IA mène des batailles de très haute intensité, avec peu, ou pas, de décisions humaines.

Les IA ont pris les options les plus agressives

Les machines orienteront-elles l'issue des grands conflits ? Et si c'est le cas, quels choix feront-elles ? Des chercheurs de l'université Stanford et de l'Institut de technologie de Géorgie (États-Unis) ont exploré cette question dans un article en prépublication (pas encore revu par les pairs), mis en ligne en janvier. Ils ont demandé à plusieurs intelligences artificielles génératives — dont ChatGPT — de tenir le rôle d'un État et de prendre des décisions lors d'un conflit avec un autre État (également dirigé par une IA). Les actions possibles allaient de l'envoi d'un message à l'attaque par arme nucléaire. Bilan ? Toutes les IA testées ont penché pour l'escalade militaire, prenant des options agressives soudaines et difficiles à prédire. Alors que des décisionnaires humains ont plutôt tendance à prendre davantage de précautions dans ces situations et à tenter de réduire les tensions. « *La nature imprédictible du comportement d'escalade montré par ces modèles souligne la nécessité d'une grande prudence en les intégrant à des opérations militaires* », concluent les auteurs.

« *Je ne suis pas sûr qu'un commandant militaire puisse être totalement dépendant d'une IA* », nuance Michael Mayer. Ce risque dépendrait du pays, selon Lance Hunter : « *La Chine pourrait être plus encline à le faire. Notamment parce que ses responsables militaires ont moins d'expérience directe du combat que chez d'autres puissances, et pourraient donc se reposer davantage sur l'IA.* » Mais aussi à cause d'une moindre vigilance du public. « *Les dirigeants des pays occidentaux doivent tenir compte de l'opinion publique, au risque de le payer politiquement,* explique Christopher Hennigan, consultant spécialisé dans la défense au cabinet de conseil Deloitte à Washington (États-Unis). *Des pays comme la Chine n'ont pas cette contrainte car leurs systèmes politiques contrôlent davantage la population et l'opinion.* » Ce qui pourrait leur donner un avantage tactique.

« *Les pays occidentaux seront tentés de laisser l'IA prendre de plus en plus de décisions, en raison de l'importance de la vitesse dans une bataille. Cependant, ils garderont toujours des humains dans les boucles décisionnelles,* prédit Lance Hunter. *Mais ces humains auront besoin d'au moins quelques secondes pour s'informer et décider.* » Des secondes qu'une armée ennemie entièrement pilotée par IA pourrait utiliser pour attaquer. Autant dire que dans un tel contexte, l'humanité risque d'être rapidement dépassée. ■

Nicolas Gutierrez C.

POUR EN SAVOIR PLUS

Le discours du minsitre des Armées sur la création de l'Amiad : **sciav.fr/928discours**

LE MOT DU MOIS

Hyperguerre (« hyperwar »)

Ce terme est apparu en 2017, utilisé par le général à la retraite du corps des *marines* des États-Unis, John R. Allen, et l'expert en intelligence artificielle Amir Husain, pour décrire un combat où l'IA prend la majorité, voire la totalité, des décisions. Le délai de cette prise de décisions serait donc presque instantané, dans le but de submerger l'ennemi sous les attaques et de ne pas lui donner le temps de réagir. Des batailles éclair qui deviendraient encore plus rapides si les deux camps s'en remettaient intégralement à l'IA.

VIVRE, CULTIVER, SOIGNER

Dans une France à +4 °C

Le réchauffement climatique va bouleverser la vie des Français : tout le monde sera concerné et peu de zones géographiques y échapperont. À quoi ressemblera la vie quotidienne dans un pays réchauffé de 4 °C en 2100 ? Éléments de réponse avec ce dossier prospectif qui détaille les outils d'adaptation à mettre en place.

Dossier réalisé par
Cécile Cazenave,
Loïc Chauveau et
Marie Parra

DATA
Peu de régions françaises seront épargnées p. 40

VIE QUOTIDIENNE
Une adaptation à préparer dès maintenant p. 42

ALIMENTATION
L'agriculture va devoir se réformer en profondeur p. 46

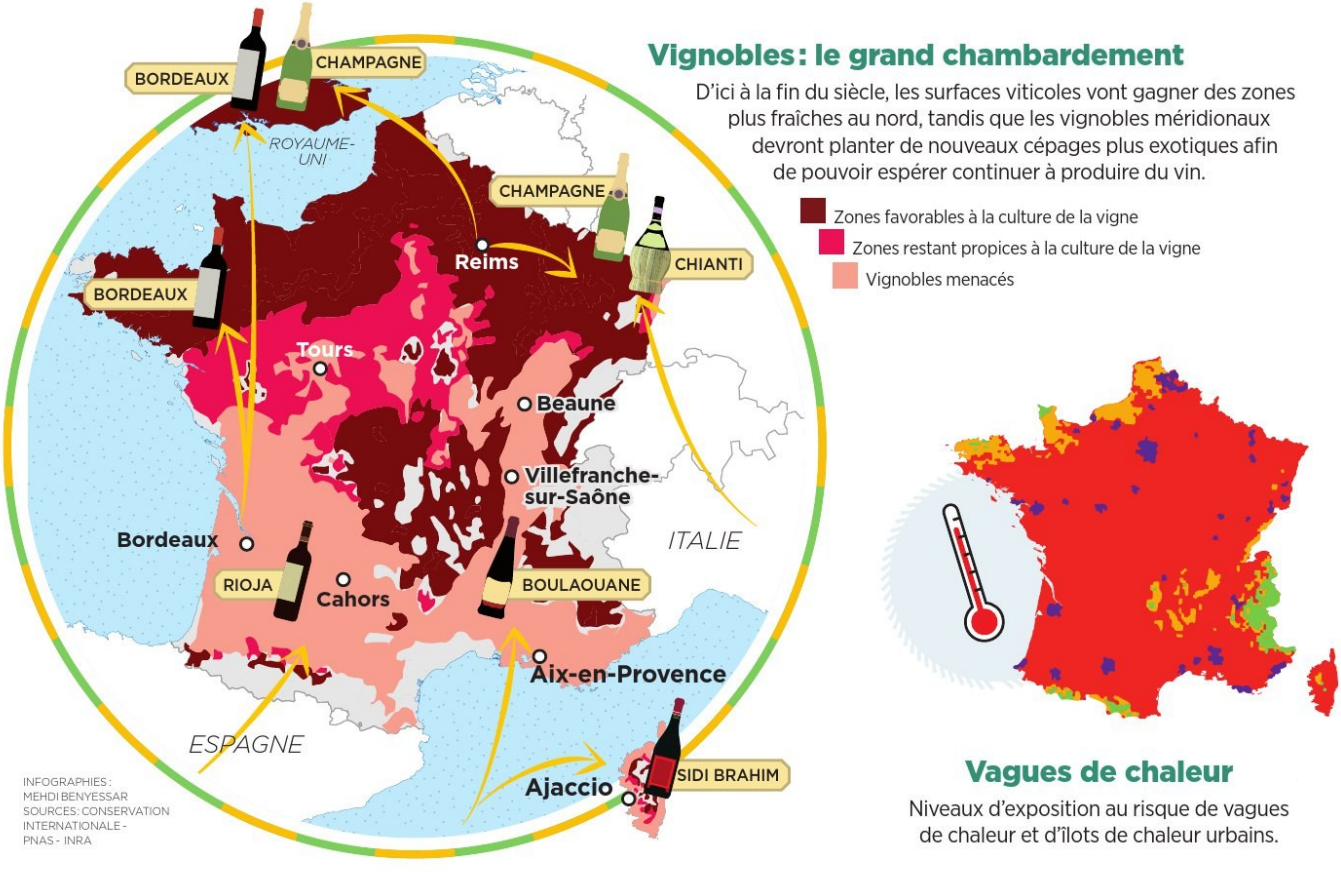
MÉDECINE
Un enjeu de santé publique de premier plan p. 50

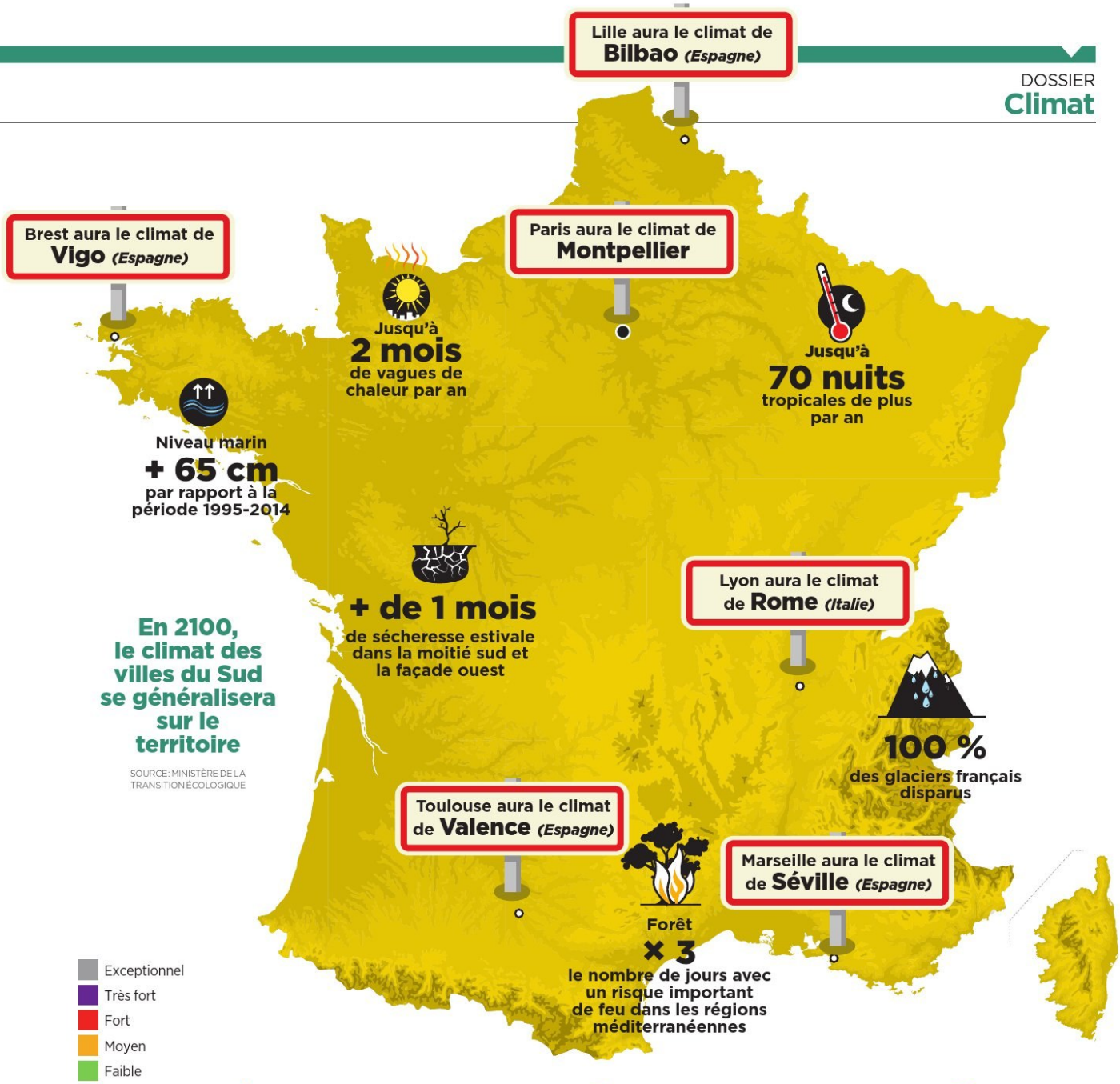
SPL/SUCRÉSALÉ

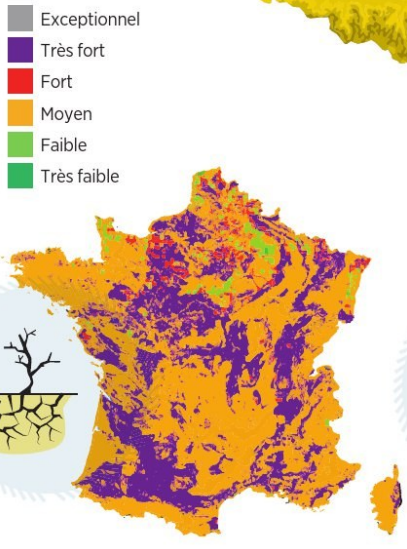
DATA

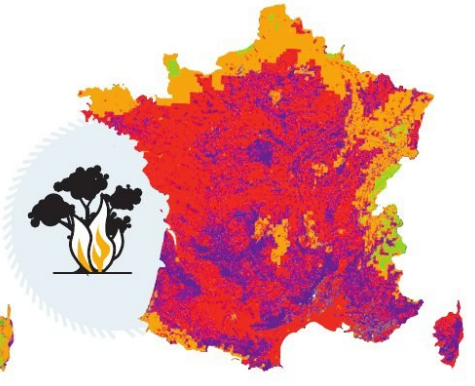
Peu de régions françaises seront épargnées

Aujourd'hui, l'engagement climatique des accords de Paris de 2015 tient toujours. L'objectif reste de limiter le réchauffement de la planète à *« bien moins de 2 °C »* à l'horizon 2100. Pourtant, début 2024, le ministre de la Transition écologique Christophe Béchu a réuni élus, citoyens, acteurs, société civile et experts pour *« échanger sur la nécessaire adaptation de la France face au +4 °C prévu d'ici la fin du siècle »*. Le constat : les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter dans le monde (+1,9 % en 2023, même si la France a réduit les siennes de 4,8 %) ; nous en sommes déjà à +1,48 °C par rapport à l'ère préindustrielle. En France métropolitaine, c'est même +1,7 °C. Les grandes villes seront soumises à des conditions que connaissent aujourd'hui d'autres villes situées bien plus au sud. Les côtes ne cesseront d'être davantage grignotées tandis que les glaciers en montagne auront disparu et que la neige sera devenue rare. Comme en témoignent ces cartes, les vagues de chaleur, les sécheresses, les incendies ou les inondations épargneront par ailleurs peu de monde. À la maison, à l'école, au travail, à l'hôpital, il faudra s'adapter partout. ■ **M. N.**









Sécheresse

Niveaux d'exposition au risque de sécheresse et retrait-gonflement des argiles.

Inondations

Niveaux d'exposition au risque d'inondation par événement extrême de pluie.

Feux de forêt

Niveaux d'exposition au risque de feux de forêt.

VIE QUOTIDIENNE

Une adaptation à préparer dès maintenant

Pouvoir espérer continuer à vivre dans des conditions acceptables avec un réchauffement de 4 °C dépendra de la capacité des pouvoirs publics à transformer en amont les manières de vivre des Français. Un défi inédit.

À quoi ressemblera la vie de tous les jours dans un pays réchauffé de 4 °C ? Voilà une question à laquelle les experts du climat sont bien en peine de répondre. La trajectoire de référence pour l'adaptation de la France au changement climatique, très récemment lancée dans le débat public par le ministre de la Transition écologique Christophe Béchu, correspondant à un réchauffement global de 3 °C d'ici à la fin du siècle, ne dit pas l'aspect qu'auront les villes, le rythme de vie des enfants, des travailleurs ou des retraités, ou encore la saisonnalité des sports d'extérieur. « *Climatiquement, on peut dire à quoi cela va ressembler, mais ça n'a pas vraiment de sens. Le Paris d'aujourd'hui n'est pas vivable à +4 °C par exemple !,* explique Magali Reghezza-Zitt, géographe spécialiste de l'adaptation, membre du Haut Conseil pour le climat. *La difficulté, c'est que la vie des gens ne va pas dépendre uniquement du climat, mais de notre capacité à avoir suffisamment transformé nos manières de vivre.* »

Essayons tout de même de brosser un paysage. Pour la géographe, il faut imaginer des hivers où le froid devient très rare mais existe encore et auquel nous serons « *de moins en moins bien préparés, donc qui génèrera beaucoup de bazar* ». Des étés qui commencent beaucoup plus tôt avec les premières vagues de chaleur en mai et les dernières en octobre, où 40 °C constituent la norme. « *Dans un climat à +4 °C, l'été 2022 est un été froid* », lance-t-elle. C'est pourtant le deuxième plus chaud enregistré depuis 1900, après 2003. Quand il pleuvra, les orages seront très violents et déverseront beaucoup d'eau. Il neigera beaucoup moins, les glaciers auront disparu, avec pour conséquence l'absence de fonte de printemps alimentant les fleuves et les rivières. « *L'eau sera une ressource rare partout en France* », note-t-elle. Les zones côtières basses seront très fréquemment inondées. « *La France va dépendre de cette ambiance climatique. Mais la vie quotidienne ne sera pas la même selon que nous aurons réussi à nous décarboner et à nous adapter, ou que nous aurons échoué* », insiste Magali Reghezza-Zitt.

Des scénarios nourris par la littérature scientifique

C'est un entre-deux que propose, dans des scénarios fictionnels nourris par la littérature scientifique existante, le cabinet de conseil BL Évolution, spécialisé dans l'accompagnement des territoires sur les questions climatiques. Dans la série « La France à +2 °C », les ingénieurs ont créé six récits de vie qui donnent une idée de la réalité de cha-

C. FOHLEN/DIVERGENCE

« La vie quotidienne ne sera pas la même selon que nous aurons réussi à nous décarboner et à nous adapter, ou que nous aurons échoué »

Magali Reghezza-Zitt, géographe spécialiste de l'adaptation, membre du Haut Conseil pour le climat

RECONFIGURATION

Dans le Jura, la station de Métabief anticipe la fin du ski

Métabief n'attend pas les effets du réchauffement. En 2050, la viabilité du ski dans cette station de moyenne montagne du massif du Jura — entre 1000 et 1400 mètres d'altitude — est estimée à zéro. Telles ont été les conclusions de l'étude ClimSnow (2020), une méthode déployée par Météo France et l'Inrae qui permet de quantifier la fiabilité de l'enneigement. À cette date, la station aura mis fin à cette activité depuis déjà vingt ans, soit en 2030. Renoncer au ski fait de Métabief une pionnière dans l'adaptation des territoires de montagne. *« La clé, c'est que cette décision est venue des professionnels de terrain, de ceux qui vivent du ski, qui ont compris que protéger les emplois signifiait ne pas s'enfermer dans un système »*, explique Olivier Erard, glaciologue de formation qui a dirigé pendant dix ans le Syndicat mixte du Mont d'Or, cheville ouvrière de ce virage. Plutôt que de prévoir le remplacement coûteux des télésièges, les élus ont accepté d'investir dans leur maintenance, afin de se contenter de prolonger leur vie. Et de réfléchir dès maintenant à un nouveau modèle, alors que le ski représente encore la moitié de l'économie touristique du territoire. VTT, handisport, trail… Reconfigurer la station de ski en « station de montagne » est un pari. *« On ne sait pas encore à quoi cela va ressembler dans cinq ans, mais se mettre en mouvement, y travailler, c'est ce qui permet de faire avaler la pilule du renoncement »*, note Olivier Erard.

Face au déficit d'enneigement, Métabief (Doubs) a décidé de s'adapter et de miser sur un tourisme « quatre saisons ».

CHARLIE ABAD / PHOTONONSTOP / AFP

cun, à la campagne comme en ville, à la montagne comme sur une île, dans un territoire — la France — soumis à des événements climatiques extrêmes devenus monnaie courante. Pourquoi pas +4 °C ? *« Si le changement climatique est un escalier, avant d'arriver à +4 °C, nous devrons passer la marche du +2 °C. Or, c'est déjà un monde chaotique qui arrivera dans un futur proche, d'ici dix à vingt ans, pour lequel nous ne sommes pas préparés et dans lequel on n'a pas envie de vivre »*, répond Alexandra Watier, consultante énergie-climat à BL Évolution et coauteure de la série. L'épopée de Richard, l'un des six personnages fictifs, en donne un aperçu. Ce cadre se réveille à Paris, pris dans la canicule. La météo annonce 50 °C. Richard a payé cher son appartement situé près d'une forêt urbaine qui procure encore un peu de fraîcheur. Il doit ce jour-là se rendre à Carcassonne (Aude) pour une réunion scellant sa nomination à un poste qu'il convoite. Dans une capitale sans transports en commun, à l'arrêt depuis plusieurs jours pour empêcher les déplacements pendant les chaleurs extrêmes, sans vélo électrique, déchargé par l'effet de coupures de courant massives, arrivera-t-il à temps ? Le réseau ferré Paris-Bordeaux est hors service sous

ÉROSION CÔTIÈRE

En Gironde, Lacanau se réorganise face à l'océan

Peut-être y aura-t-il un jour une dune à la place de la digue qui protège Lacanau. Mais, jusqu'en 2050 au moins, il s'agit de faire tenir l'ouvrage, de plus en plus attaqué par l'érosion et les vagues. Un laps de temps nécessaire pour permettre à la station balnéaire de Gironde de se réorganiser afin d'anticiper les effets du changement climatique qui la soumettent à des risques accrus de submersion notamment. L'hiver prochain, les parkings du front de mer seront démontés, les postes de secours et la Maison de la glisse, reculés. Le coût de ces opérations est évalué à plus de 13 millions d'euros. Lacanau est attaquée de longue date par l'érosion côtière. Il y a une dizaine d'années déjà, la commune a réfléchi à déplacer les logements du front de mer. Une opération aux coûts faramineux, près de 500 millions d'euros, jugée impossible. *« On ne déplace pas une ville comme cela, on ne peut pas raser des quartiers ! »*, explique Nicolas Castay, directeur du groupement d'intérêt public Littoral aquitain. Mais les effets du réchauffement se cumulent désormais et l'inaction reviendrait trop cher. Dans un scénario pessimiste, à l'horizon 2100, près de 20 000 logements, représentant une valeur de plus de 6 milliards d'euros, et plus de 1800 locaux d'activités sont menacés dans le département de la Gironde.

BAPTISTE FENOUIL/REA

La digue qui protège Lacanau des assauts de l'océan doit être régulièrement renforcée, le temps que la station balnéaire prenne une décision plus radicale, comme un déplacement des commerces et logements bâtis sur le front de mer.

l'effet de la température. Richard est dérouté sur un Paris-Lyon, bloqué ensuite à Montpellier, à l'approche d'un d'épisode méditerranéen très violent. Le taxi qu'il se résout à prendre doit lui-même quitter l'autoroute coupée par la tempête. Arrivé au bout du périple, sa réunion est annulée. *« Il y a un manque global de perception des risques,* explique Alexandra Watier. *Le changement climatique va tellement perturber nos modes d'organisation ! Il s'agit de donner des éléments pour aider à conscientiser cela. »* Les péripéties de Richard racontent le besoin d'immeubles naturellement ventilés, de réseaux électriques résilients à des chaleurs inconnues sous nos latitudes, de rails indéformables, de wagons climatisés résistants. Mais également la nécessité de s'interroger sur certains usages, à certains moments. Ainsi, est-il possible d'adapter toutes les infrastructures pour que ce voyage ait lieu à tout prix ? Ou faut-il renoncer momentanément à ce dernier ?

Car l'adaptation aux impacts du changement climatique va peser très lourd sur les finances publiques. Pour se préparer, faut-il investir dans des routes insubmersibles ? Ou plutôt imaginer des fermetures temporaires de certaines voies, ne desservant pas d'usage critique, comme un établissement scolaire ou un hôpital, lors des épisodes de crue ? *« Techniquement, on serait capable de s'adapter à tout, mais le coût serait trop élevé »*, explique Vivian Dépoues, chercheur à l'Institute for climate economics (I4CE).

Il est l'auteur du rapport « Anticiper les effets d'un réchauffement de 4 °C : quels coûts de l'adaptation ? », qui présente des éléments de chiffrage : de 1 et 2,5 milliards d'euros supplémentaires par an pour tenir systématiquement compte des vagues de chaleur dans la construction de logements neufs, *« quelques centaines de millions à quelques milliards d'euros d'investissements additionnels dans les prochaines décennies »* pour les réseaux ferrés et routiers. Pour le chercheur spécialiste de l'adaptation, inutile de se figurer l'Apocalypse. *« À +4 °C, tous les réseaux de transport ne subiront pas un cataclysme permanent, mais le niveau de service va perpétuellement se dégrader : sans adaptation, les gestionnaires passeront leur temps à courir après des réparations, les travaux structurels seront différés et le matériel se détériorera »*, explique Vivian Dépoues.

Se projeter dès maintenant pour adapter les infrastructures

Pour anticiper, il est impératif de se projeter, localement, dans le temps qu'il reste avant d'atteindre certains niveaux de réchauffement. Pour les bâtiments et les voies de chemin de fer, il est ainsi urgent d'imaginer un territoire à +4 °C. *« On ne fera pas deux fois la rénovation des logements d'ici à la fin du siècle, c'est à la fois trop compliqué et trop coûteux, de même pour les voies et les équipements des chemins de fer »*, note Vivian Dépoues. En revanche, les routes ont plus de temps devant elles. *« Le bitume d'une départementale doit être changé tous les dix à quinze ans, inutile de vouloir le remplacer avec un mélange résistant à +4 °C !,* ajoute-t-il. *Mais il faut intégrer le réflexe de se poser la question à chaque échéance. Or, pour l'instant, dans toutes les normes, les standards, les référentiels techniques, les conditions climatiques futures ne font pas référence. »* La résolution des dilemmes techniques et financiers associés ne sera pas suffisante. Elle ne dit pas la capacité d'une commune, d'un quartier, d'une famille à se réorganiser en cas de crise climatique, ni les réseaux d'entraide déjà existants ou à créer, ni enfin la capacité des habitants à inventer des modes alternatifs de déplacement ou de travail. Plus de 2 degrés de réchauffement supplémentaires auront des effets sur le cœur de nos vies. *« Quel rapport aurons-nous avec les saisons ? Quels sports pourrons-nous pratiquer ? Pourrons-nous garder les mêmes loisirs ? Le changement climatique aura un impact sur nos ressources, mais aussi sur notre culture, notre identité, nos valeurs ! Nous devons nous y préparer tout en réussissant la transition écologique, c'est une opportunité de nous questionner sur nos modes de vie »*, insiste Alexandra Watier. Des batailles de fond à mener de front. ■ **C. C.**

SOUDANE/ANDBZ/ABACAPRESS.COM

Des îlots de fraîcheur, plantés d'arbres, d'arbustes et de couvre-sol, sont créés dans la métropole lyonnaise (ici le quartier Danton).

VÉGÉTALISATION

À Lyon, des plantations de précision

Quels arbres pousseront à Lyon à la fin du siècle, alors qu'on lui promet le climat de Rome ? *« On nous parle même du climat d'Alger ! Mais en matière de végétalisation, impossible de prendre modèle : nous avons encore des épisodes de froid et nous avons besoin de rafraîchir rapidement la ville »*, explique Pierre Athanaze, vice-président de la métropole en charge de l'environnement. Car la végétation méditerranéenne, pour se protéger du chaud comme du sec, met volontairement à l'arrêt ses mécanismes d'évapotranspiration. Or, c'est cette fonction qui permet à un arbre d'endosser le rôle de climatiseur naturel. La métropole mise donc sur des essences locales (tilleul, érable, frêne) pour assurer le frais. Alors que les arbres d'alignement étaient plantés avec 14 mètres d'écart dans les années 1970, *« pour laisser deux places de stationnement entre deux arbres »*, note-t-il, il s'agit désormais de planter dense et serré. La rue Garibaldi, artère très passante, sert d'étalon. Des arbres de taille moyenne, des arbustes et des couvre-sol ont été plantés autour des plus hauts sujets et la température sous ce couvert mesurée. *« Avec ces quatre strates de végétation, on gagne 4,5 °C pendant les quatre mois d'été, et 7,4 °C pendant les canicules, par rapport à un simple platane »*, souligne Pierre Athanaze.

CULTIVER

L'agriculture va devoir se réformer en profondeur

Pour préserver les rendements, les agriculteurs devront choisir de nouvelles variétés plus adaptées et réformer leurs pratiques de gestion de l'eau. L'agroforesterie et les techniques alternatives au labour vont se généraliser.

Pour les agriculteurs, le changement climatique, c'est déjà maintenant. Dates avancées de bourgeonnement et de floraison, gels tardifs grillant des plantes trop en avance sur leur étape de développement, canicules empêchant les grains de se gonfler d'amidon, longues sécheresses assoiffant les tiges, brûlant les racines, et violentes pluies lessivant les sols. Le secteur agricole subit tous ces phénomènes depuis près de trois décennies et doit bien constater qu'ils vont en s'aggravant. Ces saisons de plus en plus chaotiques interviennent alors que la température de la France a augmenté de 1,7 °C depuis 1850. Alors, de 4 °C… L'avenir est très incertain pour bon nombre de cultures, tandis que les très placides bovins qui ne supportent pas des températures supérieures à 25 °C devront s'adapter… ou périr.

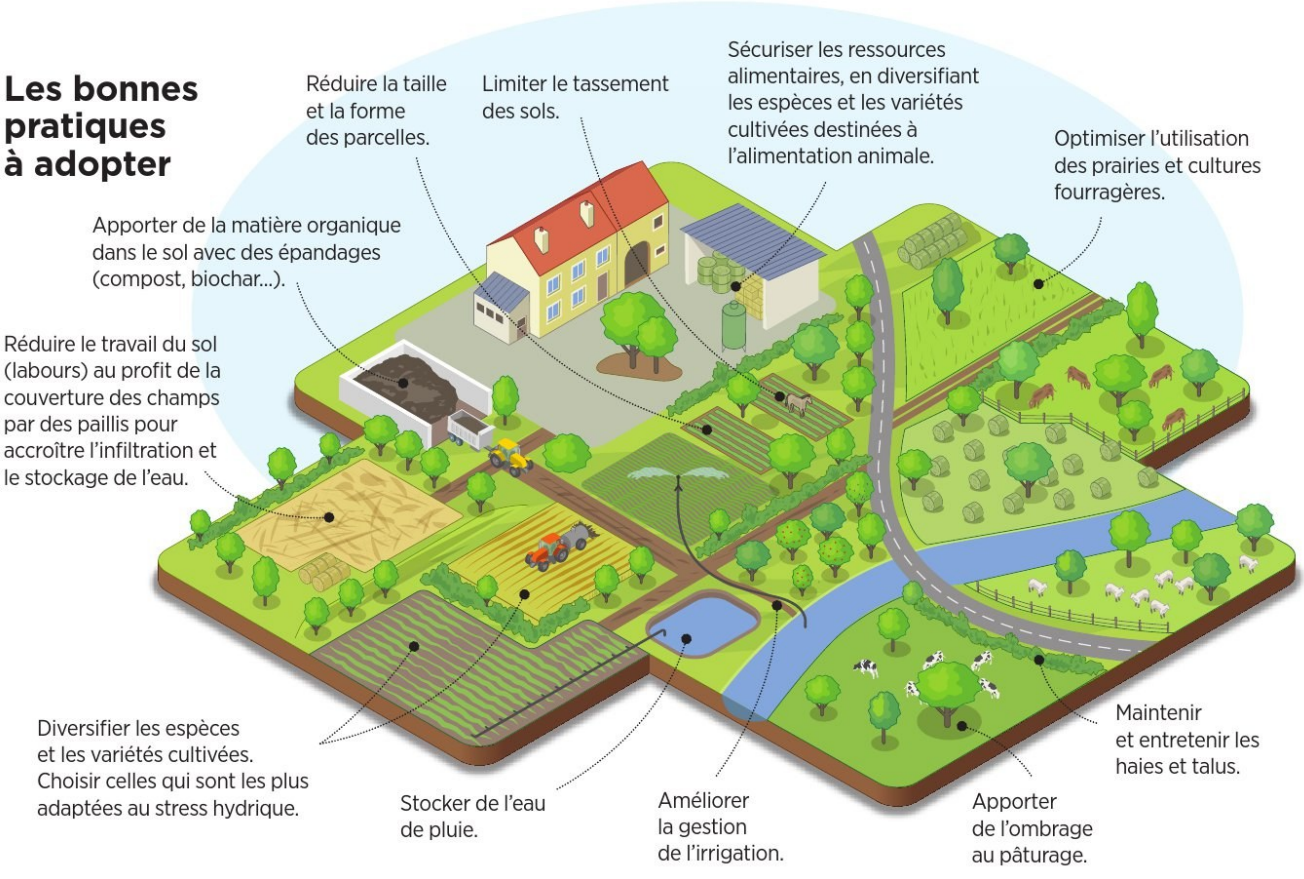
« *Pour bien objectiver l'effet des températures, nous avons plusieurs outils,* détaille Philippe Debaeke, directeur de recherche à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) de Toulouse. *Les chroniques historiques avec les dates de floraison, de récoltes toujours plus tôt dans l'année constituent un premier indice. Nous pouvons aussi, en serres contrôlées, soumettre des plantes à des atmosphères enrichies en CO_2. Les modèles, enfin, permettent de simuler la réaction des plantes au climat du futur.* »

Le bilan réel est difficile à établir. Les agronomes savent déjà qu'une température plus élevée accélère le développement des plantes, raccourcit la durée des cycles productifs et donc de la photosynthèse pour, *in fine*, produire moins de biomasse. Mais une atmosphère contenant plus de CO_2 stimule, à l'inverse, la croissance des plantes, ce qui serait le cas pour le blé, le colza et le tournesol. De même, les semis d'automne, comme le colza et le pois, devraient bénéficier d'hivers plus doux leur permettant d'allonger leur période de croissance. Pour s'y retrouver, un seul indicateur compte : le rendement. Depuis le début des années 1990, il ralentit pour le colza, stagne pour le blé, diminue pour le maïs et le pois. Ainsi, après avoir augmenté en moyenne de 1,2 quintal par hectare et par an entre 1955 et 1996, le blé ne progresse plus. Selon les études menées par l'Inrae, les variations climatiques seraient la cause directe de 30 à 70 % de cette stagnation, la part restante provenant de l'abandon des cultures de légumineuses qui enrichissaient les sols et de la diminution des épandages d'engrais chimiques. « *Pour l'agriculture actuelle, dont le principal objectif est de produire beaucoup pour compenser des prix faibles, c'est une très mauvaise nou-*

ARVALIS

« Nous pourrons fournir aux agriculteurs des variétés résistantes à la sécheresse et aux fortes températures d'ici à 2030 »

Stéphane Jézéquel, directeur scientifique de l'institut technique des grandes cultures Arvalis



velle », prévient Sylvain Doublet, agronome à l'association d'ingénierie et de conseil Solagro.

Le paysage agricole français aura-t-il complètement changé dans la seconde partie du XXIe siècle ? « *Les principales cultures que nous connaissons aujourd'hui seront toujours en place et il y aura toujours de l'élevage,* rassure Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri, directeur de l'unité agroclim à l'Inrae. *Mais, le secteur devra se réinventer en profondeur, au-delà des premières mesures déjà prises pour réduire l'impact du changement climatique.* » Pour préserver les rendements, les agriculteurs ont en effet commencé à modifier leurs pratiques. Ainsi, pour les cultures d'été comme le blé ou le tournesol, il s'agit de semer plus tôt pour profiter du réchauffement anticipé des sols et récolter avant que les vagues de chaleur de fin de printemps et début d'été n'entravent le remplissage des grains. Pour accentuer cette stratégie, les agriculteurs ont également à disposition des variétés précoces. Pour les cultures irriguées comme le maïs, un semis plus tôt au printemps d'une variété précoce ferait ainsi économiser de l'eau. « *À plus long terme, la disparition des gels hivernaux dans les régions les plus méridionales pourrait permettre de semer à l'automne des cultures traditionnellement de printemps comme le tournesol, ce qui se fait déjà en Espagne* », espère Philippe Debaeke.

Plus aucune année normale ni température de saison

L'institut technique des grandes cultures Arvalis conduit des essais en champ de ces nouvelles pratiques et travaille à la sélection de nouvelles variétés encore plus adaptées. « *La création de nouvelles variétés implique de nombreuses années de développement, puisque la recherche de caractères d'intérêt par hybridation prend du temps,* plaide Stéphane Jézéquel, directeur scientifique d'Arvalis. *Mais nous estimons que nous pourrons fournir aux agriculteurs des variétés résistantes à la sécheresse et aux fortes températures d'ici à 2030.* » Un dernier levier est enfin à disposition dès aujourd'hui : la gestion de l'eau. Les modifications de pratiques agricoles associées à l'amélioration des techniques d'irrigation peuvent dans de nombreuses régions permettre un partage équitable de cette ressource rare en été. Mais dans les régions déjà en tension comme le Sud-Ouest, des cultures deviennent très délicates à mener à bien. En Nouvelle-Aquitaine, les surfaces de maïs irrigué ont ainsi diminué de 18 % entre 2010 et 2017. Et le maïs est semé deux semaines plus tôt.

Ces modifications des pratiques ne suffiront cependant pas. Car avec le réchauffement, plus aucune année ne sera « normale », avec des températures « de saison » et des pluies tombant au bon

BRUNO BOURGEOIS

Le sorgho n'a pas besoin de pesticides (ici dans le Tarn-et-Garonne).

L'aloe vera, peu aquavore, voit le jour dans les Pyrénées-Orientales.

moment. « *Nous allons entrer dans une période où les accidents climatiques vont se succéder, si bien qu'aucune année ne sera comparable à une autre, au contraire du climat plutôt tempéré que nous avons connu et que malheureusement nous quittons* », prévient Sylvain Doublet. Les agriculteurs d'aujourd'hui en vivent les prémices. Selon les constats d'Arvalis, entre 1997 et 2021, 19 années sur 25 ont enregistré au moins un événement climatique exceptionnel ayant un impact négatif sur l'agriculture. Des épisodes de sécheresse printanière affectant la croissance des céréales sont intervenus lors de neuf années et l'échaudage des grains par l'effet de fortes chaleurs juste avant les récoltes est arrivé cinq fois. Il va donc falloir faire plus que changer quelques habitudes. Au fur et à mesure que les températures grimperont et que les saisons deviendront plus chaotiques, d'ici à 2050, les agriculteurs devront emprunter d'autres chemins techniques.

Dans un premier temps, l'agriculture de précision (météo à la parcelle, suivi par GPS des cultures, anticipation des événements météo) pourra répondre aux urgences. « *Mais il faudra ensuite diversifier sa production en adoptant des cultures nouvelles et en allongeant les rotations qui font trop souvent alterner céréales et colza seulement* », prône Sylvain Doublet. L'effort est cette fois-ci plus important. Cependant, des cultures comme les légumineuses, recommandées par les pouvoirs publics afin de réduire le déficit en protéines végétales de la France, ont des rendements décevants. Elles sont aussi moins rémunératrices que les céréales, qui connaissent depuis quelques années des cours mondiaux élevés. Par ailleurs, les coopératives, sociétés et négociants en grains ne sont souvent pas préparés à reprendre et à commercialiser ces nouveaux produits. Aussi les légumineuses voient aujourd'hui leurs surfaces diminuer. Les agronomes proposent cependant des plantes qui pourraient être exploitées avec profit : pois chiches, lentilles, soja… Mais une agriculture supportant 4 °C supplémentaires devra aller encore plus loin. D'abord, en renonçant aux grandes surfaces nues pour replanter dans le paysage des arbres, des haies et des bosquets, aptes à donner de l'ombre aux

AGROÉCOLOGIE

En Nouvelle-Aquitaine, des cultures semi-tropicales

Des oliviers à Agen ! En Nouvelle-Aquitaine, l'annonce de cette initiative constitue le signe le plus tangible que le climat autrefois océanique de la région est en train de se « méditerranéiser » alors que la hausse des températures n'est que de 1,5 °C. Imaginez +4 °C ! D'autres cultures semi-tropicales émergent déjà : le sorgho gagne du terrain tandis que le soja, le chanvre, le pois chiche commencent à s'immiscer dans les traditionnelles alternances du maïs, du colza et des céréales. Président du conseil régional, Alain Rousset en est convaincu : « *Du fait d'une eau de plus en plus rare, les rendements ont déjà commencé à baisser dans la région. Aussi faut-il accélérer la transition vers une agroécologie économe en eau, protectrice des sols, respectueuse de la biodiversité.* » Le projet Neo Terra vise ainsi à supprimer dès 2030 l'usage des pesticides de synthèse pour leur substituer des produits de biocontrôle et favoriser les petits programmes territoriaux qui voient quelques dizaines d'agriculteurs se mobiliser pour transformer leurs pratiques sur des milliers d'hectares de leur microrégion. Les cultures sont désormais choisies en fonction de la demande locale, obligeant les coopératives à s'adapter à cette nouvelle donne économique et climatique.

Un vignoble dans la Manche, comportant une dizaine de cépages.

Les mangues ont fait depuis peu leur apparition en Provence.

PATRICIA HUCHOT-BOISSIER/ABC/ANDIA.FR - A. GUIRAUD - F. LECOURT-LA PRESSE DE LA MANCHE - ALAIN GERVAIS / SAIF IMAGES

plantes et aux animaux. Les atouts de l'agroforesterie sont ainsi vantés dans toutes les enceintes, des symposiums des chambres d'agriculture aux négociations internationales de lutte contre le changement climatique.

Pratiquer les doubles récoltes comme dans les pays tropicaux

Ce retour à un paysage agricole plus arboré va de pair avec une modification radicale des modes de culture. « *On attend beaucoup des techniques d'agriculture de conservation des sols qui associent le non-labour et la couverture des champs par des paillis ou une végétation permanente permettant d'accroître l'infiltration et le stockage de l'eau* » reconnaît Stéphane Jézéquel. De même, l'augmentation des températures allonge de fait la période propice à la pousse des plantes. Ainsi, il est possible d'envisager une double récolte sur la même parcelle, comme cela se pratique dans les pays tropicaux ! « *C'est ce qu'on appelle une culture dérobée, lorsque deux plantes se suivent, et une culture en relais lorsque la seconde culture est semée au sein de la première, par exemple du soja semé dans l'inter-rang d'un champ d'orge* », détaille Philippe Debaeke. Cette seconde culture installée en début d'été nécessite des variétés précoces et un travail du sol très simplifié. Mais la disponibilité en eau pourrait limiter cette pratique qui permet de résoudre les problèmes de baisse des rendements.

On pourrait enfin voir migrer des cultures. Ce n'est pas nouveau. Confinées à l'Alsace et au Sud-Ouest dans les années 1960, les diverses variétés hybrides de maïs ont permis à la culture de s'installer jusque dans le nord de la France. 1 °C supplémentaire correspond à une remontée de 180 km vers le nord des conditions climatiques favorables à une plante. Les cultures de soja de sorgho et de tournesol progressent sur le territoire. Plante africaine, le sorgho est aujourd'hui cultivé dans le Val-de-Loire. Ces nouveaux arrivants peuvent aider les agriculteurs à augmenter la durée de leur assolement et ainsi réduire leurs besoins en pesticides. En effet, plus on étend le délai de retour d'une même culture sur une parcelle, moins la pression des ravageurs de la plante est forte. Moins de labour, plus d'arbres et de haies, des récoltes diversifiées, moins d'irrigation : si un regard peu attentif trouvera la campagne d'après 2050 semblable à celle d'aujourd'hui, celle-ci aura pourtant été le cadre d'un changement radical, aussi profond que celui qui a vu l'intensification de l'agriculture après 1945. Par chance, ces nouvelles pratiques ont aussi l'avantage d'être moins émissives en CO_2. Car en plus de s'adapter, l'agriculture devra aussi réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Pour ne pas être à la fois victime et bourreau. ■ **L. C.**

IRRIGATION

En Paca, la lutte contre la désertification

L'agriculture de Provence tire la langue. Les étés commencent désormais début mai pour finir en octobre. Entre les deux, les pluies se font rares. Les vignes, les oliviers, le blé dur, les truffières, les plantes à parfum doivent désormais être arrosés. Aussi, la politique agricole de la région tient tout entière dans la gestion de l'eau pour préserver des exploitations qui font moins de 30 hectares en moyenne. Cela passe par le déploiement de technologies innovantes d'irrigation et par la mise à contribution du Rhône pour soutenir la Durance et le Verdon. Mais dans une zone plus chaude et sèche, il faudra développer des cultures de substitution moins exigeantes en eau. Pistachiers, amandiers, grenadiers et manguiers pourraient ainsi occuper une place plus importante dans l'activité agricole du Sud.

SOLAGRO

« Il faudra diversifier sa production en adoptant des cultures nouvelles et en allongeant les rotations »

Sylvain Doublet, agronome à l'association d'ingénierie et de conseil Solagro

SE SOIGNER

Un enjeu de santé publique de premier plan

La chaleur excessive va aggraver de nombreuses pathologies, entraînant aussi une augmentation de la pollution et l'arrivée d'espèces invasives vectrices de nouvelles maladies. Des outils d'adaptation commencent à voir le jour.

On ne peut plus l'ignorer : le réchauffement global menace directement la santé des Français. De fait, la biologie des organismes est intimement liée aux températures auxquelles ils sont soumis. Et dans une France à +4 °C, nul doute que les cartes seront rebattues. Déjà en tête des motifs d'hospitalisation, les pathologies cardio-vasculaires seront aggravées… et rejointes par une probable explosion des affections pulmonaires et maladies infectieuses. « *Le bon fonctionnement de chaque organe dépend de la température du corps, donc de sa capacité à la réguler quand les conditions extérieures varient,* rappelle Jean-François Toussaint, professeur de physiologie à l'université Paris Cité. *La chaleur altère à la fois l'activité des organes, mais aussi leur capacité à faire face à des pathologies.* » Dès lors, le nombre de malades et la mortalité augmentent. Le phénomène est déjà perceptible aujourd'hui : Santé Publique France a recensé plus de 5000 décès attribuables à la chaleur lors de l'été 2023, le quatrième été le plus chaud en France depuis 1900 — après, dans l'ordre, 2003, 2022 et 2018. Pour le corps humain, la température extérieure idéale est de 23 °C. Quand elle s'élève, l'organisme déploie des mécanismes de thermorégulation pour rester à 37 °C. « *La transpiration et la vasodilatation évacuent la chaleur vers l'extérieur* », précise Kévin Jean, épidémiologiste et spécialiste de la santé et des changements globaux à l'École normale supérieure de Paris. Mais quand les températures grimpent trop, le corps ne suit plus : « *Les conséquences sur la santé peuvent s'avérer bénignes : boutons de chaleur, crampes, œdèmes… Mais aussi très sérieuses : le fameux coup de chaleur par exemple, qui se traduit par une forme d'épuisement, une perte de conscience et aboutit au décès en l'absence de prise en*

M. MOTTET

VERBATIM

MARILOU MOTTET
COORDINATRICE DE L'OBSERVATOIRE DES AMBROISIES

Le prédateur de l'ambroisie arrive en France

« En Auvergne-Rhône-Alpes, on estime que 10 % de la population est allergique à certaines espèces d'ambroisies qui se sont propagées en France. Ce genre de plantes exotiques gagne des latitudes de plus en plus élevées avec le réchauffement climatique. Mais les scientifiques ont espoir de pouvoir limiter son impact dans un futur proche. L'été dernier, le prédateur naturel de l'ambroisie, un coléoptère nommé *Ophraella communa*, a été observé pour la première fois en France, près de Lyon. En se nourrissant de la plante, il inhibe la floraison et restreint donc la diffusion de pollen. Une étude en Italie a montré que la présence de cet agent de lutte biologique avait permis de réduire de 80 % le taux de pollens d'ambroisie dans l'air. Cette méthode est d'ailleurs déjà utilisée en Chine, où des fermes d'élevage d'*Ophraella communa* sont destinées à alimenter tout le pays. »

SÉBASTIEN SORIANO/FIGAROPHOTO.COM

Les personnes atteintes de pathologies pulmonaires ou cardio-vasculaires sont davantage affectées par les pics de chaleur.

charge », ajoute le chercheur. Ces effets s'observent sur le court terme, dans les deux jours qui suivent un pic de chaleur. Ils reflètent l'impact direct des canicules qui sont appelées à se multiplier. À l'horizon 2100, « *pendant les canicules, le thermomètre pourra afficher +7 ou +8 °C en milieu urbain, par rapport aux températures d'été actuelles* », s'inquiète-t-il. Le pourtour méditerranéen sera le premier concerné. En région Paca, les modélisations des températures moyennes prévoient déjà une augmentation de plus de 3 °C d'ici à 2050.

Et ce sont les malades qui trinqueront les premiers. Eux dont les pathologies seront aggravées par la chaleur. « *D'après les résultats de précédentes études, il faut s'attendre à une surmortalité liée à tout type de pathologies, qu'elles soient cardio-vasculaires, pulmonaires ou rénales* », avertit Jean-François Toussaint. Car la chaleur affecte le fonctionnement de tous les organes, *a fortiori* ceux déjà malades. L'exemple des maladies cardio-vasculaires est éclairant : quand la température augmente, les vaisseaux sanguins périphériques se dilatent pour faciliter l'évacuation de la chaleur par le refroidissement du sang — d'où un gonflement des extrémités, doigts et orteils notamment. En contrepartie, le cœur doit fournir un travail plus important. Un effort difficile à assurer pour les personnes âgées ou souffrant d'une affection cardiaque.

Chaleur et humidité, un cocktail mortel

Les patients atteints d'insuffisance pulmonaire sont exposés à un risque similaire : les échanges gazeux au sein des alvéoles sont limités en raison de leur pathologie. « *Pendant les vagues de chaleur, les porteurs de ces insuffisances graves seront les premiers à se rendre aux urgences, à consulter et, malheureusement, à décéder* », redoute Jean-François Toussaint. Des outils de prévention permettront néanmoins des prises en charge précoces. Ainsi, l'Inserm développe une technique de prédiction du risque cardio-vasculaire grâce à des brassards capables de mesurer la rigidité artérielle.

« *Les personnes âgées et les nouveau-nés sont particulièrement vulnérables face à la hausse des températures* », indique Johanna Lepeule, épidémiologiste en santé environnementale à l'Inserm. « *Nous savons déjà que leur fonction ventilatoire risque d'être affectée par la chaleur. D'autant qu'il a été montré que plus une femme enceinte est exposée à des températures élevées, plus les capacités pulmonaires du nouveau-né risquent aussi d'être réduites, en particulier chez les filles* », ajoute la chercheuse.

À terme, même les personnes en bonne santé auront à subir les conséquences de la hausse des températures. « *Les mécanismes de thermorégulation sont énergivores et libèrent eux-mêmes de la chaleur. C'est le serpent qui se mord la queue : à mesure que la température augmente, on finit par ne plus être en capacité de s'adapter* », alerte Jean-François Toussaint. Le seuil de tolérance est d'autant plus vite atteint que le taux d'humidité dans l'air est important. En effet, plus l'air est humide et moins la transpiration est efficace pour évacuer la chaleur du corps. Ce qui accentue encore le risque de coup de chaleur, mortel en à peine quelques heures.

À l'heure actuelle, le système de santé n'est pas préparé à l'inéluctable engorgement des hôpitaux. Mais alors, comment

ROGER ERITJA / BIOSPHOTO

MOUSTIQUE-TIGRE

Échapper à l'épidémie de dengue

Aedes albopictus est au cœur de toutes les préoccupations, et pour cause : il est vecteur de 25 virus, dont celui de la dengue. Et avec le réchauffement climatique, son cycle de reproduction a été raccourci. Le moustique-tigre est de plus en plus résistant aux insecticides.
« Il faudrait multiplier les doses par 10, et même par 100, pour aboutir aux résultats d'il y a quelques années ! », estime Anna-Bella Failloux, chercheuse à l'Institut Pasteur. Il est donc urgent de recourir à des méthodes alternatives. En Nouvelle-Calédonie, les scientifiques ont créé des élevages de moustiques auxquels ils ont inoculé une bactérie nommée *Wolbachia*. *« Les moustiques continuent de piquer, mais cette bactérie empêche la transmission du virus »*, explique-t-elle. Bonne nouvelle : les femelles transmettent même cette bactérie à leur descendance ! Une méthode qui semble porter ses fruits puisque, aujourd'hui, la ville test de Nouméa ne compte plus aucun cas de dengue. Les scientifiques travaillent aussi sur des lâchers de moustiques mâles irradiés : leur descendance est stérile et les populations diminueraient ainsi progressivement. *« La réglementation européenne ne nous permet pas encore d'importer ces méthodes en France,* déplore Anna-Bella Failloux. *Mais leur usage finira par être une nécessité. »*

les individus pourront-ils eux-mêmes s'adapter ? Pour permettre à la température de retomber, il n'y a pas de remède miracle : ombre, courants d'air et salles fraîches collectives seront indispensables. La brumisation est très efficace dans un environnement sec : les gouttes déposées à la surface de la peau s'évaporent, emportant avec elles une partie de l'énergie thermique dont l'organisme doit se débarrasser.
Outre les effets directs de la chaleur sur le corps, la hausse des températures favorise la formation d'ozone dans l'atmosphère, un gaz nocif. Sur la période 2000-2018, l'Inserm pointe déjà le danger de certaines zones dites tri-exposées, dans lesquelles se combinent surexposition à la chaleur, manque de végétation — donc de fraîcheur — et pollution de l'air importante. *« Nous avons estimé que près de 8 millions de personnes vivaient dans ces* hotspots [points chauds], *essentiellement urbains, en 2018 »*, note Johanna Lepeule, coauteure de l'étude. Si, au-delà de 10 km d'altitude, l'ozone forme une couche qui absorbe le rayonnement solaire ultraviolet cancérigène, dans la basse atmosphère, il irrite les yeux et les voies respiratoires. Or, les vagues de chaleur contribuent à sa formation. *« Avec le réchauffement climatique, l'ozone risque de s'accumuler dans la basse atmosphère, d'autant plus qu'il n'est pas absorbé par les plantes »*, redoute Augustin Colette, chercheur à l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) et responsable de l'unité de modélisation de la qualité de l'air. Ce gaz se forme à partir de polluants précurseurs, émis par les activités anthropiques, les oxydes d'azote notamment sous l'action du soleil et la chaleur. *« Une exposition accrue peut favoriser et exacerber des pathologies existantes, comme l'asthme ou les bronchopneumopathies chroniques obstructives (BPCO) »*, illustre Johanna Lepeule.

Anticiper et réduire les vagues de pollens

En plus de l'ozone, la dégradation de l'air sera accentuée par les feux de forêt, les épisodes de poussières désertiques et les pollens, dont la saison s'allongera. Pour y faire face, des outils d'information sur la qualité de l'air voient déjà le jour. Dans les Pays de la Loire, des pollinariums sentinelles, jardins d'espèces végétales allergéniques, ont ainsi été implantés dans cinq grandes villes, dont Nantes et Angers. Leur observation quotidienne permet d'anticiper d'une à trois semaines les vagues de pollens. Un temps précieux pour les allergiques qui peuvent entamer leur traitement avant l'apparition des premiers symptômes. Les scientifiques espèrent par ailleurs agir pour réduire les émissions de pollens de certaines espèces allergéniques, comme les ambroisies, grâce à leur prédateur naturel *(lire l'encadré p. 50)*.
Enfin, une France à +4 °C s'accompagnera inexorablement de l'arrivée

J. LEPEULE

« Une exposition accrue à l'ozone peut favoriser et exacerber des pathologies comme l'asthme »

Johanna Lepeule, épidémiologiste en santé environnementale à l'Inserm

de nouvelles espèces exotiques. Déjà, *Ostreopsis ovata* colonise peu à peu les littoraux. Cette microalgue toxique est présente en mer Méditerranée depuis plusieurs années, mais la hausse des températures favorise son implantation à des latitudes de plus en plus élevées. Pour la première fois, elle a été observée sur le littoral atlantique, le long de la côte basque, entraînant la fermeture de plusieurs plages en 2021. La toxine qu'elle contient est à l'origine de symptômes grippaux sévères, de rhinites et d'inflammations des voies respiratoires. En période de prolifération, l'inhalation d'embruns même à quelques mètres de la plage suffit pour s'intoxiquer.

Des solutions écologiques seront aussi nécessaires

Plus connus, le frelon asiatique, la chenille processionnaire ou le moustique-tigre sont désormais présents dans toute la France continentale. *« Si ce dernier inquiète, c'est qu'il est notamment vecteur de la dengue »*, explique Anna-Bella Failloux, responsable de l'unité Arbovirus et insectes vecteurs à l'Institut Pasteur. Plusieurs méthodes sont testées pour l'empêcher de transmettre des virus aux humains *(lire l'encadré p. 52)*. Et la prochaine espèce invasive sur notre territoire pourrait être la fourmi de feu, implantée en Sicile depuis l'an dernier. Elle est redoutée en raison de ses piqûres douloureuses qui peuvent entraîner un choc anaphylactique.

Pour se prémunir de ces nouveaux dangers, la médecine ne suffira vraisemblablement pas ; elle doit s'adosser à des solutions écologiques. Les invasions de ces espèces sont en effet favorisées par la perte de biodiversité. Pour lutter contre les espèces exotiques, la restauration des écosystèmes est la meilleure stratégie. Des projets ont déjà émergé à Sarcelles, Marseille ou encore le long du Rhône, visant à reconstruire des milieux dégradés. Reste à les déployer sur tout le territoire. Plus que jamais, la santé sera globale, celle des humains dépendant de celle de la nature. ■ **M. P.**

ARIE BOTBOL/REA

ENTRETIEN

HUGO BOTTEMANNE

PSYCHIATRE À L'HÔPITAL BICÊTRE (VAL-DE-MARNE) ET À L'INSTITUT DU CERVEAU, À PARIS

« L'augmentation des températures favorise les comportements violents »

Quel est l'impact de la température sur la santé mentale ?

Plusieurs études ont montré que des variables météorologiques comme le niveau de température, d'ensoleillement ou d'humidité influait sur nos états mentaux et nos comportements : lorsque la température augmente, nous avons ainsi tendance à observer plus de comportements violents, plus d'accidents de la route, mais aussi plus de tentatives et de mortalité par suicide. Des travaux de recherche ont aussi montré que les pics de température et l'exposition prolongée à la lumière naturelle pendant les périodes estivales étaient associés aux épisodes d'hypomanie ou de manie : l'humeur est dite haute, avec une exaltation et une hyperactivité et la recherche excessive de stimulations.

Y a-t-il des profils plus vulnérables que d'autres ?

Les femmes sont généralement plus sensibles aux variations saisonnières et font plus fréquemment des dépressions pendant les périodes hivernales. Une équipe danoise a ainsi montré dans une cohorte de 1794 sujets que la prévalence de la dépression hivernale touchait 12 % des personnes interrogées, en particulier les femmes mais aussi les jeunes. Toutefois, les données sont encore parcellaires.

Quels mécanismes biologiques aboutissent à ces changements d'humeur ?

L'humeur n'est pas un état émotionnel comme la tristesse ou la joie. Elle détermine plus largement la manière dont nous générons des croyances à propos du monde environnant, dont nous réagissons émotionnellement aux événements, et dont nous agissons pour chercher des récompenses ou fuir les dangers. D'un point de vue évolutif, l'humeur pourrait ainsi être un régulateur des comportements, permettant de nous adapter aux changements de notre environnement. Pour assurer cette adaptation, le cerveau utilise des informations transmises par les organes internes, comprenant à la fois les signaux sensoriels à l'origine de la perception du corps et des signaux chimiques. Ces derniers sont utilisés par le cerveau pour calibrer les comportements, et influencent en profondeur nos états mentaux : si les muscles manquent d'apports nutritionnels, le message envoyé au cerveau va notamment participer à générer la sensation de fatigue, le désir de se nourrir et les comportements de recherche alimentaire. Les changements climatiques pourraient affecter ces processus, perturbant la mécanique bien rodée de régulation des différentes fonctions de l'organisme. ■

Propos recueillis par M. P.

Dans les coulisses de la reconstitution du dodo

À l'occasion du 30e anniversaire de la Grande Galerie de l'évolution, le Muséum national d'histoire naturelle présente pour la première fois deux reconstitutions du célèbre oiseau disparu, conçues uniquement à partir de données scientifiques.

Pinceau en main, les yeux rivés sur son modèle, le taxidermiste Vincent Cuisset habille de plumes un dodo nu — ou dronte de Maurice — dans le laboratoire de taxidermie niché derrière le musée pédagogique de la Grande Galerie de l'évolution, au Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), à Paris. Avec l'artiste plasticien Camille Renversade, il a mené un travail de police scientifique pour recréer deux spécimens fidèles à la réalité de cet oiseau, endémique de l'île Maurice, disparu depuis la fin du XVIIe siècle. Les murs de la pièce sont tapissés d'une centaine d'images et fiches de renseignement de l'espèce. Carnets de bord des marins du XVIIe siècle, croquis d'archives, peintures et littérature scientifique ont été réunis pour brosser le portrait de *Raphus cucullatus*.

« *Je ne peux m'empêcher de penser à mes prédécesseurs qui travaillaient sur le dodo il y a cent ans* », avoue Vincent Cuisset. Il nous renvoie à la toile peinte en 1903 par Henry Coëylas : les taxidermistes du MNHN tentent de reconstituer alors un dodo avec les moyens qui étaient les leurs à l'époque et fabriquent un spécimen en plâtre, encore visible dans la boutique de la Grande Galerie de l'évolution. Plusieurs décennies plus tard, la chimère de Pierre-Yves Renkin a fait son entrée dans les collections. Mais cette œuvre d'art n'avait rien de scientifique et était composée « *uniquement de matière organique* » : les pattes d'un oiseau par-ci, le bec d'un autre par-là et une robe qui collait peu ou prou à l'image du dodo. « *Jadis, ils n'avaient pas accès à toutes les ressources dont nous disposons aujourd'hui,* explique Vincent Cuisset. *Cette fois, on a essayé de faire un patchwork de ce que l'on sait à ce jour en intégrant des matériaux synthétiques et organiques. Mais il y a toujours une part d'interprétation.* » Le taxidermiste et l'artiste plasticien ont donc fait équipe avec les scientifiques qui étudient le dronte de Maurice et qui ont validé leurs choix.

La tête de l'oiseau naturalisé a été peinte à l'acrylique par Camille Renversade, plasticien et chimérologue.

Aucun spécimen naturalisé ne nous est parvenu

La difficulté de leur travail réside notamment dans le fait que « *depuis leur description, rares sont les spécimens à avoir été naturalisés* », note l'artiste Camille Renversade, spécialiste en chimérologie — l'étude de l'histoire naturelle et des créatures fantastiques. Et aucun spécimen ne nous est parvenu. Un individu exposé dans une fête foraine du XVIIe siècle a bien été conservé avant de rejoindre les collections du musée de

Les deux « Raphus cucullatus », auxquels le taxidermiste Vincent Cuisset met ici la dernière touche, sont exposés depuis le 23 mars au Muséum dans une scénographie favorisant le face-à-face avec les visiteurs, qui se trouvent comme défiés par les animaux disparus.

l'université d'Oxford (Royaume-Uni). *« Le problème, c'est qu'à l'époque, les techniques de naturalisation n'étaient pas aussi avancées et des parasites l'ont attaqué au XVIIIe siècle,* poursuit le plasticien pendant qu'il trace délicatement des écailles sur la sculpture. *Le directeur ne savait pas qu'il s'agissait d'une pièce rarissime et a ordonné sa destruction.* » Néanmoins, le musée a gardé une tête et une patte momifiées. Il s'agit des seules reliques avec de la matière organique qui nous sont parvenues.

Mastoc, à l'allure hautaine, *Raphus cucullatus* était étonnant et n'avait peur de rien. Ce qui lui valut une réputation d'imbécile : dans certains textes, on le surnomme parfois *Didus ineptus*. Pour se débarrasser des idées reçues, Vincent Cuisset et Camille Renversade ont travaillé la posture du dodo avec Anick Abourachid, professeure au MNHN et spécialiste en morphologie évolutive : les pieds sont situés à l'aplomb des genoux lorsqu'ils sont debout. Les études morphométriques sur la taille et le poids des oiseaux menées par la paléontologue Delphine Angst ont servi, quant à elles, à la conception du volume des mannequins.

> « On a essayé de faire un patchwork de ce que l'on sait en intégrant des matériaux synthétiques et organiques. Mais il y a toujours une part d'interprétation »
>
> **Vincent Cuisset,** taxidermiste au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

Facile à attraper, il a été abattu en masse par les marins

Chignon blond et pinceau en bouche, Camille Renversade peaufine les derniers détails avant d'appliquer une couche de vernis pour ajouter de la brillance. Il passe le sèche-cheveux, un coup de brosse et poursuit la narration de l'histoire du dodo. Sans prédateur, ce cousin des pigeons était doté de deux petites ailes mais il ne volait pas et n'était pas un athlète de haut niveau. Il pesait entre 9 et 15 kg — jusqu'à 20 kg pour les plus gros — pour un mètre de haut environ. Il affichait un air penaud, *« accablé de son propre poids »*, selon la description du naturaliste Buffon.

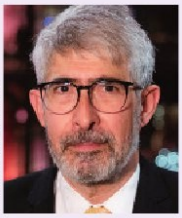
La mise en plumes du dronte de Maurice s'est faite à l'aide d'une colle au pH neutre, puis le taxidermiste a effectué des raccords de couleurs, avant le vernissage de l'ensemble et un dernier coup de brosse.

Sa viande n'était pas appréciée, mais cela n'a pas empêché les marins de l'abattre en masse. « *On trouve des témoignages, tel celui de l'amiral hollandais Wybrand van Warwjick, où on le surnomme l'oiseau dégoûtant ou écœurant. Sa chair ferme et de mauvais goût devait être bouillie pendant des heures. Il n'a pas été consommé par plaisir mais par facilité* », abonde Camille Renversade. Facile à attraper, il fut emporté dans les navires pour être mangé sur la route du retour. Ses œufs ont été aussi consommés en nombre par les animaux arrivés d'Europe. Il a été vu pour la dernière fois en 1681. Cent ans ont suffi aux humains pour éteindre cette espèce qui vivait dans l'île Maurice depuis quatre millions d'années.

Six oies de Toulouse ont servi à fabriquer la robe

Le dodo est ainsi passé d'allégorie du ridicule à emblème des espèces disparues du fait des activités anthropiques. Pour habiller les vedettes, Vincent Cuisset s'est rapproché des centres de soins, des parcs, de l'office de la biodiversité, et a mené un casting minutieux. « *On m'interroge souvent sur le choix de ne pas prendre des pigeons qui appartiennent à la même famille. La réponse est que le dodo est beaucoup plus imposant et qu'il faudrait beaucoup de pigeons pour le recouvrir, et donc faire beaucoup de raccords de peau. En plus, les plumes ne seraient pas forcément de la bonne dimension* », explique-t-il.

Il y avait plusieurs candidats pour fabriquer les robes des dodos du MNHN. La teinte des dindons se rapproche du gris bleuté décrit dans les archives, mais les plumes ont une pointe assez triangulaire et ils n'ont pas de plumes au cou. Vincent Cuisset a étudié le plumage de la bernache du Canada et du cygne noir juvénile. « *Ce sont des oiseaux dont la dimension correspond plus ou moins au volume du dodo pour retrouver des plumes qui sont à la bonne dimension* », détaille le taxidermiste. Mais


THOMAS SAMSON / AFP

ENTRETIEN

GILLES BLOCH PRÉSIDENT DU MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE (MNHN)

« Contribuer à la préservation des espèces encore présentes »

Pourquoi avoir choisi le dodo pour marquer le coup des 30 ans de la Grande Galerie du MNHN ?
Quand je pense au dodo, j'ai le cœur serré car on a pu le voir dans les films et les dessins animés alors que c'est l'emblème d'une éradication très rapide. L'espèce a été décrite et elle a aussitôt disparu. Je me suis par ailleurs entretenu avec le président du Musée national du Brésil, à Rio de Janeiro, et il a demandé qu'on lui fournisse une réplique fidèle du dodo comme celles que nous avons faites pour la salle des espèces menacées et disparues.

Quel est le rôle de la Grande Galerie dans la préservation de la biodiversité ?
C'est un lieu de mémoire où l'on expose des spécimens naturalisés. Certains d'entre eux témoignent de l'extinction causée en grande partie par les activités humaines. Cette galerie participe à la conservation en informant et en sensibilisant le public. L'éduquer par le jeu et l'émerveillement, c'est donc une façon de contribuer à la préservation des espèces qui sont encore présentes.

C'est votre première année de mandat au MNHN. Quels sont vos projets pour ce lieu ?
Continuer à développer la galerie comme un grand outil de diffusion de connaissances, notamment avec des technologies numériques comme la réalité virtuelle et augmentée. On a déjà un cabinet permanent de réalité virtuelle et l'an dernier, nous avons lancé une exposition immersive sur les mondes disparus dans la galerie de minéralogie. L'autre aspect est d'ordre logistique. Pour continuer à travailler sur ces spécimens dans les meilleures conditions, il est indispensable de s'agrandir. Mon prédécesseur, Bruno David, avait déjà amorcé le projet d'un deuxième site à grande échelle. Je suis en train de le relancer et de chercher les financements pour le rendre possible. ■

Propos recueillis par Y. H.

c'est l'oie de Toulouse qui a été élue pour parer les mannequins. La taille est similaire et la couleur ainsi que la forme des plumes correspondent aux descriptions. Il est important de souligner qu'aucun animal n'a été sacrifié pour cette reconstitution. *« Un éleveur qui a eu malheureusement des pertes récemment m'a mis de côté six individus qui sont morts dans son élevage »*, précise le taxidermiste. Les oies ont été dépouillées, préparées et tannées par ses soins. La partie arrière des oies a été teintée à l'aérographe pour uniformiser la couleur. *« Cette partie arrière est blanche chez les oies alors que chez les dodos ce n'est pas décrit ainsi »*, explique Vincent Cuisset. Et même au sein d'une seule espèce, chaque oie a une robe différente : au taxidermiste de raccorder les deux robes sur le dodo et de faire en sorte d'atténuer les variations de couleurs. *« C'est une vraie difficulté »*, confesse-t-il. Chacune des reconstitutions présente une teinte qui correspond aux descriptions : l'une a une tonalité marron et l'autre un gris légèrement bleuté. S'agit-il donc d'un mâle et d'une femelle ? Vincent Cuisset ne s'avance pas. *« Jusqu'à présent, il n'y a pas de dimorphisme sexuel avéré chez les dodos. Il n'est donc pas possible de l'affirmer. »*

Après une courte pause, il ajuste son tablier noir et se remet à la mise en plumes des oiseaux. Avec une colle au pH neutre, d'une texture assez visqueuse, il fixe délicatement la peau à la sculpture. *« Cette colle fonctionne assez bien car elle ne dégrade pas le cuir, elle ne sèche pas trop vite — ce qui permet de corriger les défauts — et se lave facilement à l'eau. »* Pour la scénographie, le MNHN essaie de reconstituer aussi la première rencontre entre les marins et les dodos. Offrant un face-à-face où visiteurs et oiseaux échangent des regards et s'inspectent mutuellement. Le taxidermiste s'émeut en les imaginant à leur place : *« Ils sont curieux et guère craintifs. Ils vous regardent défiler, le bec ouvert. On a déjà fait un test en les plaçant sur la vitrine et cela fonctionne assez bien. Il y a un dialogue, une histoire qui se crée. »* ■

Yoanna Herrera
Photos : Sophie Steinberger pour Sciences et Avenir-La Recherche

Quand le sable du Sahara recouvre la France

Depuis 2020, le pays connaît une augmentation de l'intensité et de la fréquence des nuages de poussières en provenance du désert africain. Un phénomène qui pourrait être dû à des changements dans les modèles de circulation atmosphérique.

Les automobilistes européens ont beaucoup fréquenté les stations de lavage ce printemps. Le 8 avril, en particulier, un gros nuage de particules en provenance du Sahara a survolé l'Espagne, la France et l'Allemagne à une hauteur de 5000 mètres, provoquant des dépôts sur l'ensemble de ces régions. Cet épisode était le troisième à survenir en à peine deux semaines. Le service européen de surveillance de l'atmosphère Copernicus (Cams) avait déjà comptabilisé un premier nuage à la mi-décembre 2023 sur les Canaries, puis, du 23 au 31 janvier, un large panache a traversé l'Atlantique pour se déposer en Amérique latine, tandis qu'une extension vers le nord affectait la Scandinavie. Un nouveau transport de poussières a eu lieu à la mi-février, affectant l'Europe de l'Ouest et du Nord. Aux Canaries, les habitants n'ont vécu que 12 jours d'air ambiant respectant les normes sanitaires de l'Organisation mondiale de la santé — de 50 microgrammes par m^3 de particules fines — sur les 90 jours de l'hiver météorologique !

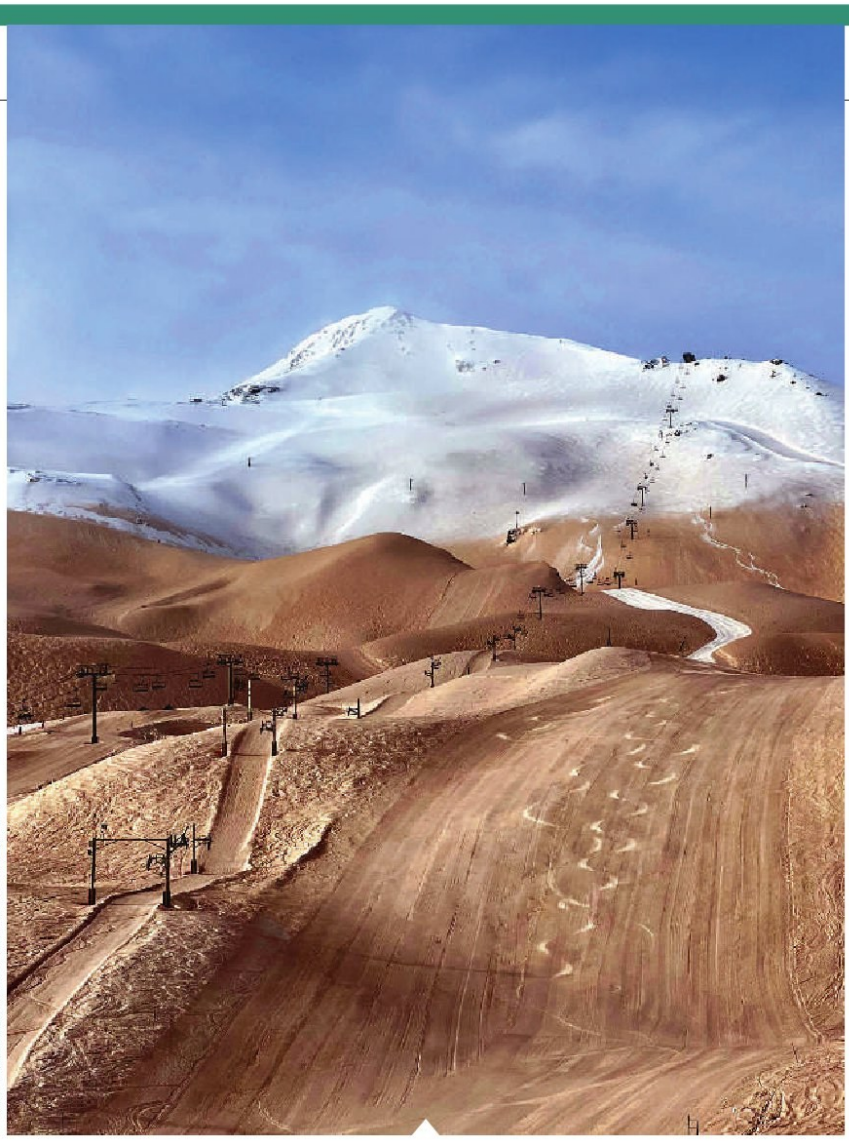
Des hivers de plus en plus « poussiéreux »

Grâce aux satellites Sentinel, le service Copernicus mesure deux paramètres : les teneurs en particules fines de moins de 10 micromètres (PM10) dans l'atmosphère et l'absorption du rayonnement solaire par ces poussières. Les météorologues peuvent ainsi suivre des panaches qui voyagent entre 2000 et 6000 mètres d'altitude en moyenne. Les transports ont lieu principalement d'avril à septembre, quand les sols et l'atmosphère sont plus secs et donc plus sensibles à l'érosion éolienne. Or, depuis 2020 et à l'exception d'une année 2023 calme, les hivers sont de plus en plus « poussiéreux ». *« Bien qu'il ne soit pas inhabituel pour des nuages de poussières sahariennes d'atteindre l'Europe, nous*

BIOGÉOCHIMIE

Un engrais naturel pour les forêts

Entre 2010 et 2013, le laboratoire de biogéochimie des écosystèmes forestiers (Inrae Nancy) a estimé les apports en nutriments par les poussières sahariennes sur quatre sites forestiers de Bretagne, du Morvan, des Vosges et de la Meuse, à 123 kg par hectare et par an en moyenne. *« Ces retombées représentent de 10 à 38 % des particules nourrissant les sols forestiers, les émissions des épandages agricoles locaux restant plus importants »*, tempère Marie-Pierre Turpault, coauteure de ces travaux. Les forêts retiennent deux fois plus de poussières que les sols agricoles, car la grande surface foliaire et la hauteur des arbres permettent de mieux les retenir. *« Nous avons pu mesurer que l'apport majeur est le phosphore, ce qui est très positif pour les sols forestiers, le calcium et le magnésium étant des éléments que l'on retrouve également, mais dissous dans l'eau de pluie »*, ajoute la chercheuse.

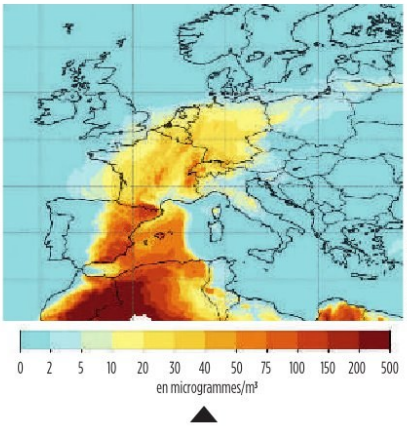


BORJA DEL GADO DERSUUZ/COVER IMAGES/ABC/ ANDIA.FR

Le manteau neigeux pyrénéen a été recouvert en mars 2022 par du sable émanant du Sahara, un phénomène dû à une dépression observée au Portugal.

constatons une augmentation de l'intensité et de la fréquence de tels épisodes dans les années récentes, ce qui pourrait potentiellement être attribué à des changements dans les modèles de circulation atmosphérique », craint ainsi Mark Parrington, chercheur au Cams.

La ceinture de déserts partant de Mauritanie pour se terminer en Asie centrale *via* le Moyen-Orient est la principale source mondiale de production de particules minérales. Le Sahara seul en est responsable de plus de la moitié. Les nuages sahariens sont provoqués par de nombreuses configurations météorologiques. « *Pour l'Europe, la situation la plus fréquente, c'est la présence d'une dépression dans le proche Atlantique, près des côtes européennes. Elle provoque une rotation des vents à l'inverse des aiguilles d'une montre, qui passent au-dessus du Sahara et provoquent ainsi l'érosion des sols et la mise en suspension des particules* », explique Pierre Nabat, chercheur au Centre national de recherches météorologiques (CNRM-Météo France). Soit un flux du sud similaire à celui qui produit les canicules. Ce phénomène est constaté au début du printemps dans l'est du bassin méditerranéen et se décale vers l'ouest en cours d'été. Les épisodes hivernaux sont donc complètement atypiques.



SOURCE: CAMS

Les prévisions de concentrations de poussières du panache de sable, réalisées par le service européen de surveillance de l'atmosphère (Cams) pour le 8 avril 2024.

À la croisée de deux phénomènes

Dans une étude à paraître, une équipe de chercheurs espagnols fait remonter à 2020 l'émergence de ce changement. Selon eux, deux phénomènes se croisent. D'abord, le blocage d'une dépression dans le proche Atlantique provoquant des vents forts sur le Sahara est une situation météorologique de plus en plus fréquente. Ensuite, le Maghreb subit depuis plusieurs années une sécheresse qui rend les sols fragiles. Cette nouvelle tendance doit cependant être confirmée, car la période concernée est trop courte pour en tirer une conclusion solide. Reste que la succession et l'intensité des événements interrogent.

Peut-on incriminer le changement climatique ? L'affaire est compliquée. Certes, la hausse des températures génère des sécheresses récurrentes dans le bassin méditerranéen, mais les poussières sahariennes, composées de silicates et de carbonates, absorbent le rayonnement solaire et bloquent donc la chaleur dans les hautes couches de l'atmosphère, refroidissant la surface de la planète. « *Par ailleurs, ces poussières servent également de point de condensation pour la vapeur d'eau et facilitent donc la formation de pluies* », ajoute Pierre Nabat. Les interactions et rétroactions sont donc multiples et rendent difficile toute conclusion définitive. ■

Loïc Chauveau

Greffes

Améliorer la transplantation d'organes

Des milliers de patients sont en attente d'une greffe. La pénurie d'organes que connaît la France incite les médecins à innover pour mieux préserver les greffons avant l'opération et anticiper les risques de rejet. En attendant des techniques plus futuristes comme les organes artificiels ou les xénogreffes.

Par Hugo Jalinière et Sylvie Riou-Milliot

C'est un petit ruban vert qui peut se porter toute l'année, mais qui marquera surtout ce samedi 22 juin, journée nationale de réflexion sur le don d'organes. Un symbole de soutien à cet acte solidaire et collectif qui sauve des vies. Un signe de gratitude aussi envers les donneurs, et d'espoir pour les quelque 21 000 patients inscrits sur les listes d'attente. Malheureusement, chaque année, plus de 800 d'entre eux décèdent, faute de donneurs. Car si 80 % des Français se disent favorables au don d'organes, le taux de refus moyen opposé par les familles au moment du décès atteint encore 36 %. Si on y ajoute la crise de l'hôpital public et l'impact de la pandémie de Covid-19, l'activité de transplantation est plus que jamais fragilisée. D'où la nécessaire recherche d'alternatives et d'améliorations, dont nous vous proposons ici cinq pistes. Les équipes de transplanteurs parviennent ainsi chaque jour à repousser un peu plus les limites de ces interventions ultrasophistiquées en s'affranchissant des contraintes de temps, d'espèce et en personnalisant de plus en plus finement leurs approches. C'est ce que nous montrent l'évolution des techniques de conservation des organes, les xénogreffes récentes et encore inimaginables il y a quinze ans, ou bien les meilleurs prédictions de rejet du greffon. Sans oublier les possibilités offertes par les dons vivants et les espoirs des organes artificiels qui, de l'intérieur, pourraient suppléer un jour les organes défaillants. ■

BURGER/PHANIE

CHIFFRES CLÉS

1=8

1 don peut sauver 8 vies (un cœur, deux poumons, deux reins, un foie, un pancréas, un intestin).

5634

greffes d'organes en 2023.

21 866

patients inscrits sur liste d'attente au 1er janvier 2024.

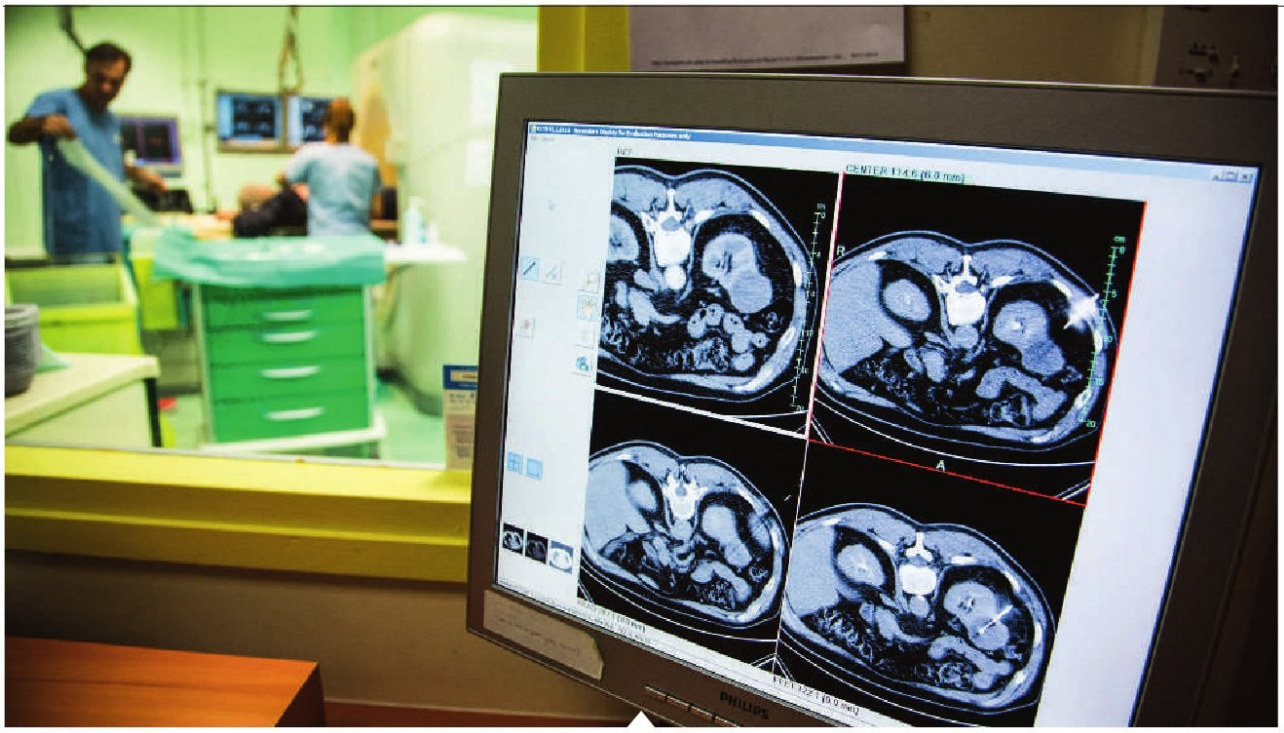
823

patients décédés en 2023, soit entre 2 et 3 morts par jour.

80 %

des Français se disent favorables aux dons mais le taux de refus exprimé par les familles est de 36 %.

SOURCE: AGENCE DE LA BIOMÉDECINE.



GARO/PHANIE

Une évaluation plus fine des raisons du rejet du greffon conduit à mieux traiter le patient (ici, biopsie rénale à l'hôpital Saint-Louis, à Paris).

Un algorithme pour un meilleur diagnostic du rejet

Mieux anticiper le risque de rejet pour optimiser les prescriptions de traitements immunosuppresseurs. L'enjeu est important car si aujourd'hui, le risque de rejet aigu (dans les heures qui suivent la greffe) est assez bien maîtrisé, il n'en va pas de même pour le rejet chronique, survenant après des mois ou des années. En effet, selon des mécanismes complexes liés à la qualité de la réponse immunitaire du receveur, à la toxicité des médicaments immunosuppresseurs, mais aussi à des phénomènes biologiques et infectieux, les greffons subissent, au fil du temps, des lésions répétées aboutissant inexorablement à une perte de leur fonction. *« La classification internationale du diagnostic de rejet est devenue tellement complexe ces dernières années que peu de médecins la connaissent par cœur »*, détaille le Pr Alexandre Loupy, directeur de l'Institut de transplantation de Paris et du Paris Transplant Group, néphrologue, biologiste et biostatisticien.

L'outil déjà utilisé pour le rein va se décliner sur d'autres organes

Avec son équipe, il a développé pour le rein Banff automation system, un algorithme intégrant la totalité des paramètres, et démontré que près de 45 % des évaluations faites par les médecins étaient fausses et susceptibles de conduire à des prescriptions inadaptées d'immunosuppresseurs. *« Mieux diagnostiquer le rejet permet de mieux traiter les patients*, explique le spécialiste. *On peut ainsi prescrire plus si le rejet est avéré, mais aussi ne pas traiter si ce n'est pas utile. Nous sommes aujourd'hui en train d'évaluer l'impact du recours à cet outil sur la qualité de vie de premiers patients, quelques centaines à ce jour.* » Présenté en mai 2023 dans *Nature*, l'outil a été validé par différentes sociétés savantes internationales de transplantation et est déjà utilisé pour le rein en France (hôpital Necker-Enfants malades et hôpital Saint-Louis à Paris) et à l'étranger (Cedars-Sinaï Medical Center à Los Angeles, aux États-Unis).

Déjà, l'équipe parisienne, qui travaille aussi sur la xénotransplantation *(lire p. 64)*, s'apprête à décliner son outil pour d'autres organes (cœur, poumon, foie). Sans oublier l'axe de recherche des biomarqueurs sanguins et urinaires, comme signature du rejet. *« Parmi les candidats prometteurs, la détection dans le sang des patients greffés de l'ADN du donneur semble majeure et nous l'étudions dans des essais en cours en greffe rénale et cardiaque »*, indique Alexandre Loupy. ■

Mieux préserver les greffons

Tout juste prélevé au CHU de Lille puis stocké dans un contenant spécial, ce cœur devra être transplanté sur un patient dans les quatre heures qui suivent.

LAURENT MAYEUX/COLLECTIF DR

Pas plus de quatre heures de délai pour transplanter un cœur, six à huit heures pour un foie ou un poumon, vingt-quatre à trente-six heures pour un rein. Cette classique image de course contre la montre, entre poches de glace et hélicoptère, est en train de devenir obsolète. Car depuis déjà plusieurs années, confrontés à la pénurie d'organes et au changement de profil des donneurs, plus âgés, atteints de maladies chroniques rendant les greffons moins optimaux, les transplanteurs ont dû s'adapter. Ils ont développé des moyens de préservation (mais aussi d'amélioration) des différents organes greffables. L'objectif est simple : greffer plus de patients tout en permettant aussi aux équipes de programmer à terme les interventions pour ne plus opérer de nuit.

Réalisé en janvier, le projet Pégase est une première française. Après un vol commercial de douze heures au-dessus de l'Atlantique, des Antilles vers l'Hexagone, un cœur a été transporté et conservé grâce à un dispositif particulier (Heart Assist Transport), une perfusion hypothermique *ex vivo*,

Développer les dons vivants

Donner de son vivant l'un de ses reins ou, plus rarement, un lobe de son foie, c'est possible. Et même souhaitable : le taux de survie à dix ans des greffons issus de donneurs vivants est de 72 %, contre 55 % pour ceux prélevés sur des personnes décédées. Alors que le nombre de patients en attente de greffe rénale augmente*, cette option est aujourd'hui un axe prioritaire pour l'Agence de la biomédecine, qui espère lui faire atteindre en 2026 un taux de 20 % de l'activité totale des greffes (contre 15 % aujourd'hui). Mais les difficultés générales d'accès aux salles opératoires — ici il faut deux blocs proches, disponibles le même jour — et le manque chronique de personnel infirmier formé viennent malheureusement en freiner le développement. ■

* En 2022, 5260 nouveaux patients inscrits et 3377 greffes rénales (soit 125 de plus qu'en 2021).

Miser sur les organes artificiels

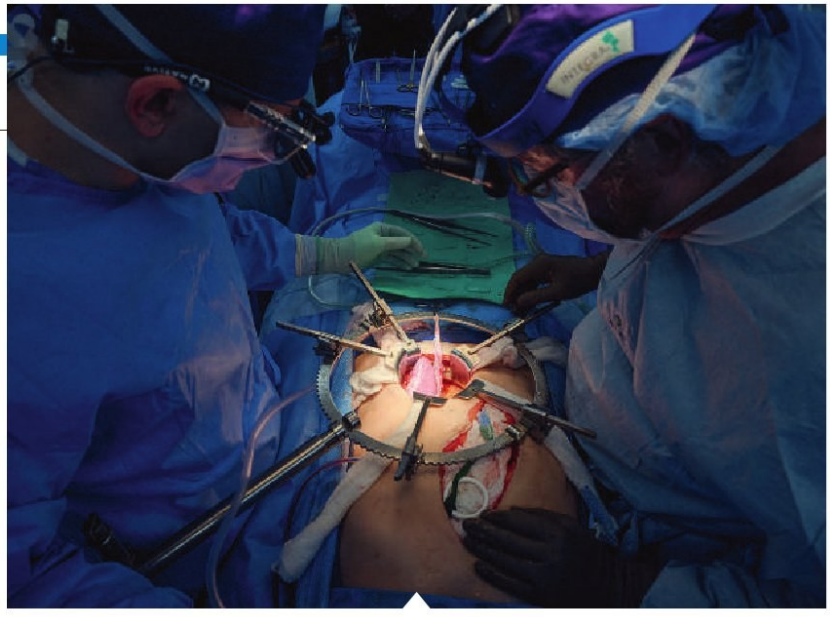
Régénérer un foie de l'intérieur, c'est la stratégie innovante de médecine régénérative présentée en mars par la firme américaine LyGenesis. Après des essais prometteurs chez l'animal montrant une amélioration de l'insuffisance hépatique, un premier essai sur l'humain vient de démarrer. Atteint d'insuffisance hépatique sévère, un patient a reçu une injection de ses propres cellules de foie dans ses ganglions lymphatiques. Objectif : y créer un mini-foie palliant la défaillance de l'organe principal. De quoi au moins patienter en attente d'une greffe. 12 malades doivent être inclus dans cet essai. D'autres équipes à travers le monde ont recours aux techniques de bio-ingénierie et d'impression 3D pour créer de nouveaux organes *(lire* S. et A. *n° 908)*. ■

avant d'être greffé à Paris. « *L'objectif est de mettre en place un programme durable de transplantation cardiaque aux Antilles françaises* », écrivent dans le *Lancet* leurs auteurs, les Pr Guillaume Lebreton et Pascal Leprince, de l'hôpital de La Pitié-Salpêtrière, à Paris.

Un allongement des délais de transplantation

Il y a deux ans, une équipe suisse de l'hôpital universitaire de Zurich était parvenue à greffer au bout de trois jours un foie initialement considéré comme non transplantable, une première mondiale. L'organe, conservé dans un dispositif particulier (Liver4life, Wyss Institute) imitant les fonctions du corps humain (perfusion normothermique à 37 °C), avec en outre un ajout d'antibiotiques et d'hormones, avait été greffé avec succès soixante-douze heures plus tard. Selon des travaux publiés en 2020 dans *Nature Biotechnology*, cette équipe helvète avait même démontré qu'un délai de sept jours était envisageable. À l'hiver dernier, elle avait aussi conclu qu'il était désormais possible en douze jours, grâce à un protocole de perfusion, de dégraisser des foies humains trop gras considérés comme non greffables, et de réduire de 70 % le taux de graisses accumulées.

Que les perfusions d'organes soient froides ou chaudes, enrichies ou pas en différents agents visant à toujours optimiser la survie des futurs greffons, les spécialistes imaginent déjà des « organs hubs », des plateformes où les organes seraient à disposition des équipes 24 h/24. Mais rien ne se fera, s'inquiètent-ils déjà, sans la présence à leurs côtés des « perfusionnistes ». Des infirmiers spécialisés essentiels — il en existe 300 en France — assurant déjà la surveillance des interventions complexes (circulation extracorporelle) et, demain, de tels dispositifs. Or, leur statut est toujours en instance de reconnaissance. ■



JOE CARROTTA / NYU LANGONE HEALTH / AFP

La transplantation d'organes animaux permettrait de pallier la pénurie de greffons (ici un essai avec un rein de cochon greffé en 2023 sur un patient en mort cérébrale).

Le boom des xénogreffes

Envisagée dès le début du XXe siècle, la transplantation d'organes animaux chez l'humain n'est plus un rêve de savant fou. La maîtrise croissante des techniques d'édition génétique ces dix dernières années a permis de lever, au moins en partie, la barrière des espèces. De fait, il est désormais possible de faire naître des cochons génétiquement modifiés pour offrir des organes plus compatibles avec l'immunité et l'anatomie humaines.

C'est ainsi qu'en mars, l'unité de transplantation du Massachusetts General Hospital à Boston (États-Unis) annonçait, après cinq essais sur des personnes en état de mort cérébrale ces trois dernières années, la première transplantation d'un rein de cochon sur un patient vivant, qui a pu rentrer chez lui. Le greffon porcin a été fourni par la société américaine eGenesis qui avait procédé à 69 modifications génétiques sur le cochon donneur. En 2022, puis 2023, c'est cette même société qui avait livré deux cœurs de cochon génétiquement modifiés à l'université du Maryland (États-Unis) pour procéder aux premières xénogreffes cardiaques sur deux patients non éligibles à une greffe classique. Bryan Benett et Lawrence Faucette avaient ainsi survécu respectivement huit et six semaines, passant la phase critique du rejet aigu. Si, à l'évidence, la compatibilité immunologique reste à peaufiner pour faire des xénogreffes une option généralisable, ces premières médicales font du cochon « OGM » un nouvel eldorado de la transplantation. L'espoir réside dans le fait de disposer d'un réservoir inépuisable de greffons animaux pour les patients ne pouvant plus attendre et pallier ainsi la pénurie mondiale. C'est dans cette optique qu'en août 2023, l'équipe du Pr Alexandre Loupy à l'Institut de transplantation de Paris a élucidé dans leurs moindres détails les mécanismes en jeu dans la réponse immunitaire après une xénogreffe de rein porcin. Grâce à des biotechnologies d'immunologie et de microscopie moléculaire, les chercheurs ont mis en évidence une forme inédite de rejet « *médiée par les anticorps* ». Il ouvre ainsi des perspectives prometteuses pour la contrer et donner aux greffons animaux une survie enfin acceptable. ■

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

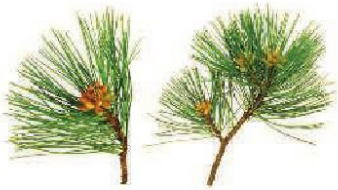
Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

Indispensable irrigation

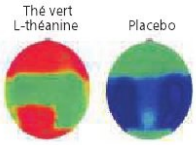


Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au **01 84 25 91 97** ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 et 120 cp sont disponibles grâce aux codes **ACL 295 18 63** et **636 08 99**

Un vaccin plus efficace contre le zona

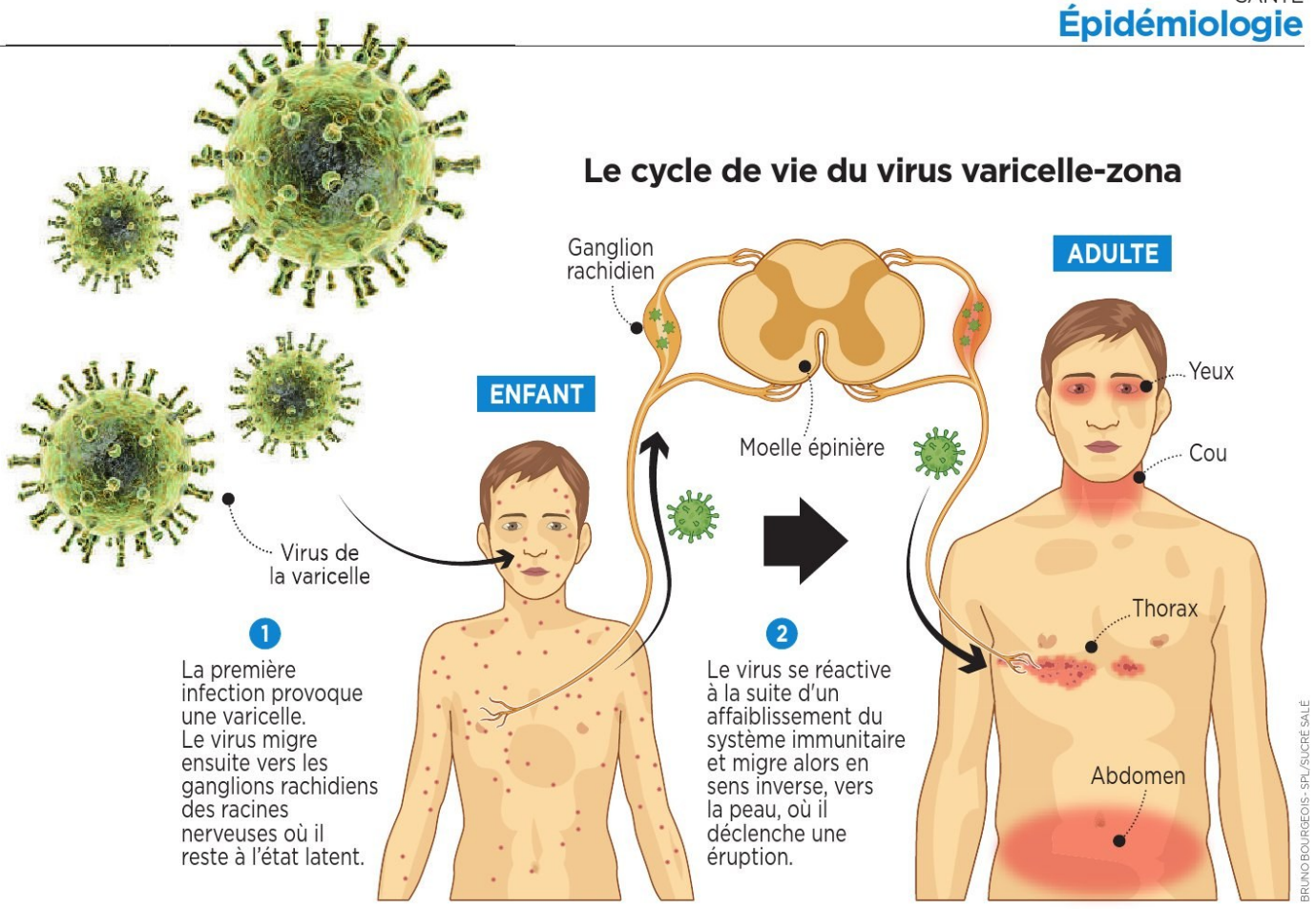
Après six ans d'attente, un vaccin prometteur vient d'être recommandé par les autorités de santé françaises pour prévenir cette maladie infectieuse très douloureuse. Avec une efficacité inédite de 79 %, il pourrait concerner 15 millions de personnes, dont les immunodéprimés et les plus de 65 ans.

En général, ceux qui présentent un jour un zona — soit 235 000 cas chaque année en France — ne l'oublient jamais tant les symptômes sont pénibles. Mais si plus de 90 % des adultes en France sont porteurs du VVZ (virus varicelle-zona, de la famille des herpèsvirus) et qu'un sur trois développera la maladie au cours de sa vie, un récent sondage Ipsos montre que celle-ci demeure très mal connue. Cet étrange virus, dont l'une des particularités est d'être exclusivement humain (pas de réservoir animal), possède la capacité de provoquer à deux âges de la vie deux maladies distinctes : la varicelle *(lire l'encadré p. 68)* et le zona. Mais celui-ci ne survient que chez des personnes ayant développé une varicelle dans l'enfance. Pourquoi un tel décalage dans le temps ? Parce que le VVZ est capable de rester pendant des années endormi et latent, bien caché dans des ganglions situés près de la moelle épinière. Et il n'y a à ce jour aucun moyen de prédire le moment où il se réveillera en provoquant le zona. Cela peut se produire à la faveur d'une maladie, mais aussi sans raison apparente, en particulier chez les plus âgés et les immunodéprimés.

Plus l'âge augmente, plus la maladie est fréquente et sévère

La seule façon de prévenir le développement de la maladie est la vaccination. Or, un nouveau vaccin (Shingrix, laboratoires GSK) vient justement d'être recommandé par la Haute Autorité de santé (HAS), car il est jugé plus efficace que son prédécesseur le Zostavax (laboratoires MSD), soit 79 % contre 45 %. *« C'est une bonne nouvelle, très attendue, surtout pour les immunodéprimés »*, estime le Dr Liem Binh Luong, du centre d'investigation clinique de l'hôpital Cochin (Paris), spécialiste des questions vaccinales. En effet, ce groupe particulièrement à risque (transplantés, greffés de moelle osseuse, patients atteints de VIH, de maladies hématologiques, personnes sous corticoïdes au long cours, etc.) ne pouvait pas bénéficier de l'ancien vaccin, de type vivant atténué. Ce sera désormais possible avec le nouveau vaccin de conception très différente — dit non vivant recombinant avec adjuvant —, qui bénéficiera à ce groupe à risque mais aussi aux plus de 65 ans, selon les recommandations des autorités sanitaires. Car plus l'âge augmente, plus le zona est fréquent et sévère, le système immunitaire devenant moins efficace pour garder le virus « sous contrôle ». Si l'incidence avant l'âge de 60 ans est d'un à deux cas pour 1000 patients par an, elle est quatre fois supérieure à 65 ans (huit cas sur 1000) et six à huit fois plus élevée après 75 ans.

Selon les estimations du laboratoire GSK, la vaccination pourrait concerner au total plus de 15 millions de personnes en France : 1,3 million d'immunodéprimés (150 000 nouveaux



chaque année) et les 14 millions de plus de 65 ans (800 000 de plus par an). La maladie se traduit par une éruption de petites vésicules, non pas généralisée à l'ensemble du corps comme avec la varicelle, mais limitée à un territoire bien précis, un dermatome *(voir l'infographie ci-dessus)*, correspondant au territoire innervé par le nerf concerné. Dans environ 10 % des cas, l'éruption peut avoir lieu au niveau de l'œil et il s'agit alors d'un zona ophtalmique, véritable urgence oculaire. Souvent, sont aussi présentes des douleurs (décharges électriques, brûlures). Et si la forme bénigne peut disparaître en deux semaines, la maladie peut se prolonger par des douleurs neuropathiques dites post-zostériennes (DPZ), susceptibles de devenir chroniques. Dans 10 % des cas, ces douleurs nécessitent une hospitalisation, selon un rapport de l'Académie de médecine sur la vaccination des seniors paru fin 2023. D'où l'intérêt de limiter ces conséquences par la vaccination.

Une trentaine de pays ont déjà adopté ce vaccin

La stratégie de prévention du zona dans l'Hexagone est très récente : elle n'a démarré qu'en 2013, quand le seul vaccin alors disponible avait été recommandé par le Haut Conseil de la santé publique (HCSP) pour tous les adultes de 65 à 74 ans, selon un schéma à une seule dose, pour prévenir le zona et les douleurs neuropathiques. À cette époque, le HCSP avait considéré qu'il réduisait l'incidence du zona (-51 %), celle des douleurs neuropathiques (-66 %), tout comme leur intensité (-61 %). Mais, outre le fait que le Zostavax ne pouvait être utilisé chez les immunodéprimés, il s'est avéré qu'il perdait de son efficacité avec le temps. Résultat : il n'a finalement pas vraiment rencontré son public, la couverture vaccinale sur le territoire étant actuellement considérée comme très faible (moins de 2 %). L'arrivée de Shingrix change donc la donne : à ce

SOURCE : HAS

235 000
cas
de zona par an en France (dont 10 % de cas ophtalmiques).

58 ans
l'âge moyen
de la contraction de la maladie.

2600
personnes
hospitalisées chaque année pour un zona, dont 72 % ont plus de 65 ans.

SANTÉ PUBLIQUE

Vacciner (ou pas) contre la varicelle

En France, la vaccination généralisée contre la varicelle des enfants de plus 12 mois n'est aujourd'hui pas recommandée dans une perspective de santé publique. Mais le choix individuel de vacciner son enfant demeure : deux vaccins (Varivax, Varilrix, avec 2 doses espacées de quatre à dix semaines) sont disponibles. Les 700 000 cas de varicelle recensés chaque année dans l'Hexagone (dont 90 % chez les moins de 10 ans) sont en fait la plupart bénins. Mais la gravité augmentant avec l'âge, la vaccination demeure réservée à des situations bien particulières : les plus de 12 ans n'ayant jamais eu la varicelle dans l'enfance, les femmes en âge de procréer non enceintes, les adultes proches d'une personne atteinte de varicelle (dans les trois jours suivant l'exposition), les personnes en attente d'une greffe d'organe et toute personne non immunisée en contact avec des immunodéprimés. D'autres pays (États-Unis, Canada, Allemagne, Autriche…) ont, eux, introduit la vaccination généralisée depuis plusieurs années. Et les données de surveillance épidémiologique n'indiquent pas pour effets le déplacement de la période de survenue de la maladie vers l'âge adulte ni le développement de formes sévères de la maladie, des craintes qui prévalaient dans l'Hexagone au moment du choix de ne pas recommander cette vaccination.

jour, il a été adopté dans une trentaine de pays à travers le monde. Environ 64 millions de personnes l'ont déjà reçu, selon un schéma à deux doses intramusculaires espacées d'un intervalle de deux à six mois.

Mais entre l'arrivée sur le marché de ce vaccin en 2018 et le feu vert des autorités sanitaires françaises, il aura fallu attendre six ans. En 2022, la HAS, saisie par la direction générale de la Santé, avait précisé dans une note de cadrage que la stratégie de vaccination nationale allait être réactualisée afin de déterminer la place respective des deux vaccins. Elle avait alors créé un vaste groupe de travail multidisciplinaire comprenant des gériatres, transplanteurs, hématologues, infectiologues, médecins généralistes et infirmiers, sans oublier des économistes, des associations d'usagers et un expert du Centre national de référence des herpèsvirus (Limoges). Et ce n'est finalement que le 29 février dernier que l'avis a été rendu. Reste à savoir quel accueil ce nouveau vaccin recevra du public, et si les médecins le proposeront. En tout cas, les immunodéprimés, eux, se disent prêts.

MEHR A KHABIBI/INSERM

« C'est une bonne nouvelle, très attendue, surtout pour les immunodéprimés »

Dr Liem Binh Luong, spécialiste des questions vaccinales, centre d'investigation clinique de l'hôpital Cochin (Paris)

Plus de 85 % des participants à une étude prêts à être vaccinés

Dès janvier, sept associations de patients* ont réagi très rapidement. Avec le soutien de GSK, elles se sont rapprochées de MoiPatient, une plateforme collaborative créée par l'association Renaloo en 2018 pour lancer ensemble l'étude Zonimmune, dont l'objectif est d'évaluer dans cette communauté le niveau de connaissances tant sur la maladie que sur la vaccination. Le questionnaire, disponible en ligne pendant deux mois, a été rempli par plus de 350 participants, avec une forte représentation (76 %) d'immunodéprimés sévères.

Selon les premiers chiffres disponibles, la plupart d'entre eux (90 %) ont déjà entendu parler du zona, un sur deux en ayant même déjà souffert. Mais s'ils semblent majoritairement prêts à se faire vacciner (plus de 85 %), les données sont moins bonnes à propos de leur connaissance des vaccins existants ou sur la contagiosité de la maladie, ignorée par une personne sur trois. Pour rappel, une personne atteinte de zona peut transmettre la varicelle, mais pas le zona. Ils sont aussi 71 % à ne pas savoir que le nouveau vaccin leur est accessible.

Une inconnue demeure : sa prise en charge financière. Pour l'instant non remboursé (200 à 300 euros la dose), son prix précis ne sera rendu public qu'à l'issue des négociations en cours avec le Comité économique des produits de santé (CEESP), ce qui déterminera ensuite son inscription ou non dans le calendrier vaccinal. ■

Sylvie Riou-Milliot

* Actions traitements, Association française du lupus, Association France spondyloarthrites, Egmos (Entraide aux greffés de moelle osseuse), HTaPFrance (Association des malades, aidants et transplantés hypertension pulmonaire), Renaloo, Transhépate.

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

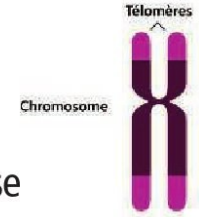
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

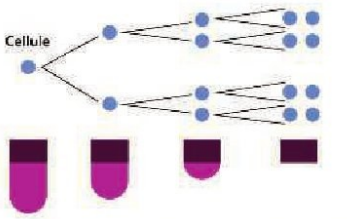
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par déclencher la fin du cycle de reproduction de la cellule, appelé sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

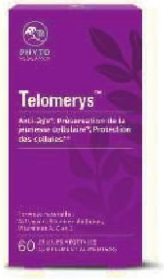
Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Des conseils ?

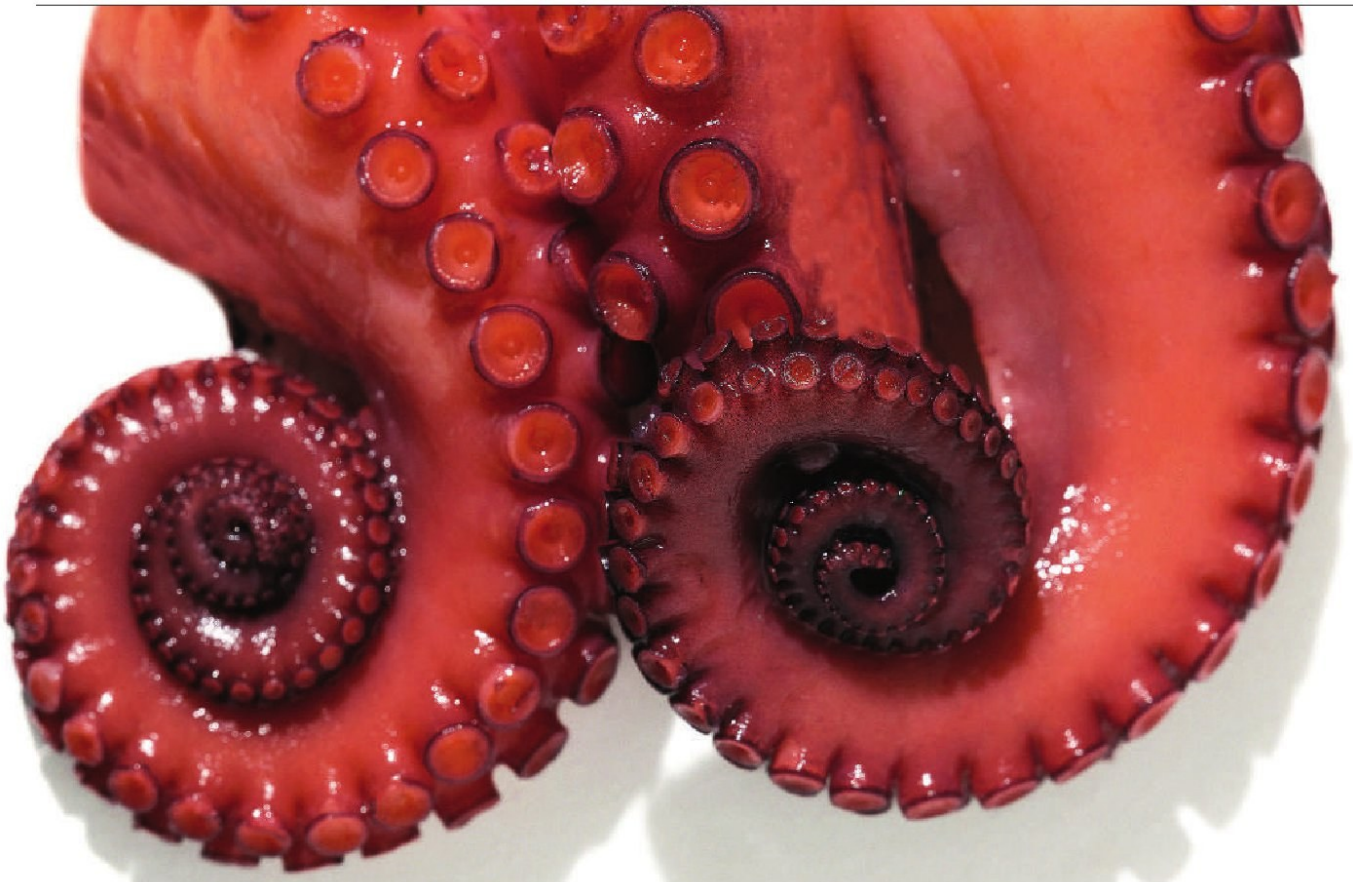
Les experts du laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 84 25 91 61** et sur www.telomerys.com

Telomerys™ :
Préservation de la jeunesse cellulaire



Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56



Le poulpe, nouvelle star des mers

Ce mollusque regorge de qualités nutritionnelles : il apporte divers minéraux, des oméga-3 et des vitamines. Bien iodé, il est aussi très riche en protéines.

Tacheté, blanc ou musqué…, ce **mollusque**, malgré son aspect peu attrayant, colonise les poissonneries ! Alors qu'il pullule sur les côtes bretonnes, sa consommation ne cesse d'augmenter depuis trente ans (+30 % en Europe et +60 % aux États-Unis environ) (1), au point que des projets d'élevage industriel sont en cours dans le monde (comme en Espagne, par exemple) pour faire face à la demande, ce qui d'ailleurs n'est pas sans soulever des questions environnementales.

Appréciés depuis l'Antiquité, ses tentacules sont devenus une source d'inspiration culinaire pour les restaurateurs qui les accommodent grillés ou en salade. « Chatrou » pour les Antillais, « zourite » pour les Réunionnais ou encore « poufre » pour les habitants de Sète, le poulpe regorge de qualités nutritionnelles.

130 000 tonnes

de poulpes sauvages sont consommées chaque année en Europe. Avec 60 000 t par an, l'Italie est le plus grand consommateur ; la France se classe sixième (7 000 t).

SOURCE : CIWF.

Poulpe et pieuvre, le même mollusque

Poulpe et pieuvre sont deux termes désignant cet animal marin de la classe des céphalopodes et de l'ordre des octopodes. Issu du grec *polypus* (qui signifie « plusieurs pieds »), le poulpe a huit bras et un corps mou. Deux genres de poulpe dominent le marché mondial : l'octopus (dont les bras sont bordés de deux rangées de ventouses) et l'élédone (une seule rangée de ventouses).

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

MOLLUSQUE Animal invertébré au corps mou, souvent pourvu d'une coquille. On en distingue sept classes, dont celles des gastéropodes (escargots, limaces…), des bivalves (moules, huîtres…) et des céphalopodes (seiches, pieuvres…).

VITAMINE B12 Elle fait partie du groupe des huit vitamines B (B1, B2, B3, B5, B6, B8, B9 et B12) solubles dans l'eau, que notre organisme ne peut pas stocker.

ACIDE ARACHIDONIQUE Acide gras poly-insaturé présent dans les œufs, les huiles végétales (maïs, tournesol, etc.) et la viande rouge, précurseur des prostaglandines et des leucotriènes, des médiateurs de l'inflammation.

Le poulpe commun *(Octopus vulgaris)*, qui vit en Méditerranée, tout le long de la côte Atlantique ainsi que dans les eaux littorales japonaises, est l'espèce la plus commercialisée. À noter que le calamar (appelé aussi chipiron, supion ou encornet selon les régions) est aussi un céphalopode qui appartient au sous-ordre *Decabrachia* (céphalopodes à dix bras), comme la seiche. Tandis que la pieuvre se tapit dans les fonds marins, le calamar évolue, lui, en pleine mer.

C'est une excellente source de vitamine B12

Le poulpe en fournit 36 microgrammes pour 100 g, soit neuf fois plus que les apports recommandés et 18 fois plus qu'une portion (100 g) de cabillaud. La **vitamine B12**, présente principalement dans les aliments d'origine animale, est essentielle au fonctionnement normal du système nerveux et à la formation des globules rouges. Avec la vitamine B9 (24 microgrammes/100 g), la B12 est indispensable à la synthèse de l'ADN et à la multiplication cellulaire. Par ailleurs, le poulpe est très riche en protéines (30 g/100 g, contre 25 g/100 g de bavette) de qualité, qui apportent l'ensemble des acides aminés essentiels à l'organisme (2).

Peu de lipides mais des oméga-3

Peu calorique (156 kcal/100 g), le poulpe renferme de faibles quantités de lipides (1,5 %). Les acides gras poly-insaturés représentent environ la moitié des acides gras totaux. On compte ainsi 25 % d'acide docosahexaénoïque (DHA), 14 % d'acide eicosapentaénoïque (EPA), tous deux des oméga-3, et 10 % d'**acide arachidonique**, un oméga-6 (3). Connus pour être bénéfiques à la santé cardio-vasculaire et cérébrale, les oméga-3, anti-inflammatoires, auraient également un effet protecteur sur la fonction pulmonaire (4). Le poulpe apporte par ailleurs une quantité modérée de cholestérol (96 mg/100 g).

Il renforce l'immunité

Le poulpe regorge de fer, indispensable à la formation de l'hémoglobine, une protéine des globules rouges qui transporte l'oxygène vers les organes et les muscles et joue, entre autres, un rôle dans la réponse immunitaire anti-infectieuse. Avec 9,5 mg/100 g, il fournit 87 % des apports journaliers conseillés pour un humain.
Le poulpe renferme aussi de bonnes quantités de cuivre (0,74 mg/100 g, soit 40 % des apports recommandés), de zinc (3,36 mg/100 g), ainsi que 1,2 mg/100 g de vitamine E (5), tous impliqués dans la régulation du système immunitaire.

L'attendrir avant de le consommer

La fraîcheur du poulpe se limite généralement à deux jours après la pêche, et le mollusque ne doit pas dégager d'odeur forte à l'achat, laquelle signifierait que la décomposition a déjà débuté. Pour une conservation prolongée, on peut le congeler — sans dépasser les deux mois afin de préserver au mieux ses qualités gustatives. Une brève congélation permet également d'attendrir sa chair caoutchouteuse en cassant ses fibres musculaires, tout comme une cuisson lente après avoir plongé trois fois les tentacules dans une eau frémissante. ■

Sylvie Boistard

AURORE LAVERGNAT Diététicienne-nutritionniste à Audenge (Gironde)

Il est très reminéralisant

« Outre du fer, ce mollusque apporte divers minéraux tels que le calcium (106 mg/100 g, soit 11 % des besoins quotidiens recommandés), le phosphore (280 mg/100 g), le magnésium (60 mg/100 g) et le potassium (630 mg/100 g), bon pour la santé cardio-vasculaire. C'est aussi une bonne source en iode (92 % des apports conseillés), qui contribue à l'équilibre thyroïdien, et en vitamine B3 (3,78 mg/100 g) qui intervient dans le métabolisme du glucose, des acides aminés et des acides gras. Mais comme tous les produits marins, attention à sa teneur en sel (1,15 g/100 g). »

(1) Octopus factory farming: a recipe for disaster, CIWF, 2021.

(2) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(3) Total lipids and fatty acids composition of the coastal and the deep-sea common octopus (Octopus vulgaris) populations: a comparative study, Ben-Youssef S. et al, *Nutrition and Health*, 2008.

(4) Investigating Associations of Omega-3 Fatty Acids, Lung Function Decline, and Airway Obstruction, Patchen B.K. et al, American *Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2023.

(5) Références nutritionnelles en vitamines et minéraux, Anses, 2021.

V. STANOJLOVIC/GETTY IMAGES

Cinq questions pour prendre soin de sa vue

Notre vision évolue tout au long de la vie. Des mesures de prévention peuvent être mises en place pour réduire le risque de certains troubles ou en repousser l'apparition.

Par Émilie Gillet, avec Agence Forum News

1 Peut-on prévenir les problèmes de vue ?

Concernant les troubles de la vision et les maladies pouvant affecter celle-ci, les principaux facteurs de risque sont, d'une part, les prédispositions génétiques (myopie, hypermétropie, astigmatisme), et d'autre part l'âge (presbytie, dégénérescence maculaire liée à l'âge ou DMLA, cataracte…). Mais de nombreuses actions peuvent être entreprises pour réduire les facteurs de risque ou en freiner l'évolution. La plus importante, c'est de protéger ses yeux contre le soleil et ce dès le plus jeune âge. Les rayons ultraviolets (UV) de la lumière du soleil endommagent en effet la rétine et favorisent, à long terme, la survenue de la cataracte et de DMLA. Il faut également protéger ses yeux contre les traumatismes potentiels (notamment les éclats ou liquides corrosifs), quand on bricole, jardine ou manipule des produits dangereux. Enfin, pour réduire le risque de fatigue visuelle lorsqu'on travaille sur un écran, il est conseillé de faire des pauses toutes les heures pour porter son regard au loin (et forcer ainsi les yeux à varier leur niveau d'accommodation).

2 Comment bien protéger ses yeux du soleil ?

Le plus important est de se protéger contre les rayons UV, invisibles à l'œil nu mais très nocifs pour la rétine, et non de l'éblouissement causé par la lumière visible. Pour cela, il faut vérifier que les lunettes répondent à la réglementation européenne et disposent d'un filtre UV : le marquage CE doit figurer sur l'étiquette ou être gravé dans la monture. La catégorie de protection, de zéro à quatre, doit aussi être indiquée : privilégier un niveau 3 et une mention UV 400 (qui indique un filtrage à 100 % des UV). Bon à savoir : les lunettes de vue, même si leurs verres ne sont pas teintés, peuvent disposer d'un filtre anti-UV. À l'inverse, certaines lunettes solaires fantaisie, sans marquage CE, représentent un risque important : comme la luminosité est réduite par la teinte des verres, la pupille se dilate et laisse pénétrer une plus grande quantité d'UV jusqu'à la rétine. Enfin, pensez à choisir un modèle bien couvrant, car plus de la moitié de la lumière qui pénètre dans l'œil rentre latéralement.

EN FRANCE

70 % des adultes portent des lunettes ou des lentilles de contact (97 % des plus de 60 ans). (Source : Drees, 2019.)

52 jours de délai moyen pour obtenir un rendez-vous chez un ophtalmologue en 2022, contre 68 jours en 2019. (Source : SNOF, 2023.)

Près de **60 % des Français préoccupés** par le suivi de leur santé visuelle. (Source : SNOF Ipsos, 2023.)

3e FORUM EUROPÉEN DES MOBILITÉS BAS CARBONE PAU 2024

Le 3° Forum Européen des Mobilités Bas Carbone, qui vient de se tenir à Pau (Pyrénées Atlantiques) les 6 et 7 mai dernier, a mobilisé pas moins d'une cinquantaine d'experts et de professionnels internationaux venus d'horizons différents. Conscients de l'urgence climatique, ces économistes, cabinets d'études, représentants des industries européennes de l'automobile et des carburants ont conclu à la nécessité de chercher à unir leurs forces… et leurs énergies !

Leurs échanges et propositions formulés aux représentants de la Commission Européenne et aux élus présents feront partie des éléments permettant d'enrichir ou de modifier les clauses de revoyure prévues en 2026.

« Nous commençons à comprendre que le tout électrique ne permettra pas de tenir les trajectoires de la décarbonation pour 2050, pour des raisons technologiques, industrielles, économiques et sociétales. Nous devons donc imaginer et prendre en compte d'autres solutions ». Les propos introductifs de **François BAYROU**, Maire de Pau et Haut Commissaire au Plan, couplés, par écran vidéo interposé, à ceux du Ministre de la transition écologique et de la cohésion des territoires, **Christophe BECHU**, démontrent bien de l'intérêt de réunir sur un même plateau des visions complémentaires plus qu'opposées.

« Les rencontres organisées annuellement depuis 2022 par la **Communauté d'Agglomération Pau Béarn Pyrénées** deviennent une cellule d'ingénierie d'idées capitale pour éclairer les débats de la Commission, car on ne ferme la porte à aucune solution » a rappelé **Herald RUIJTERS**, Directeur de la DG MOVE avant d'ouvrir le dialogue avec les experts présents.

Tous ont avancé la nécessité d'avoir une vision et un cadre réglementaire européen incitatif pour pouvoir intégrer les carburants liquides bas carbone dans l'équation, et espérer ainsi atteindre les objectifs de réduction d'émissions de CO^2 rappelés en introduction par **Wokpe HOEKSTRA**, Commissaire européen à l'action pour le Climat.

EXPLORER TOUTES LES SOLUTIONS POSSIBLES

Parmi les intervenants, **FUELSEUROPE**, la voix de l'industrie européenne de la fabrication de carburants, a notamment rappelé qu'il n'existe pas de solution unique en matière de mobilité durable. Toutes les régions du monde, tout en allant dans la même direction, ont besoin de pouvoir utiliser les solutions les mieux adaptées à leurs marchés.

Les dérivés d'éthanol, les biocarburants de 1ère et de 2ème génération, comme les e-fuels, avec des usages et des destinations différentes sont autant de solutions matures selon qu'il s'agisse du fret, du maritime ou de l'aérien. Pour rappel, contrairement aux carburants conventionnels fabriqués à partir de pétrole, les e-fuels sont des carburants synthétiques produits à partir d'hydrogène vert obtenu par l'électrolyse de l'eau, avec de d'électricité renouvelable et l'ajout de dioxyde de carbone capté dans l'air. En utilisant des e-fuels s'agissant de CO^2 capté, la quantité de CO^2 dans l'atmosphère n'augmente pas, ce qui rend ces e-fuels neutres en carbone.

Réduire les émissions des carburants de 70% permet aux véhicules thermiques d'avoir un bilan carbone « du puits à la roue » équivalent aux véhicules électriques.

Du côté de **TEREGA**, acteur majeur des infrastructures de transport et de stockage de gaz en Europe, dont le siège est à Pau, on rappelle qu'il existe également des solutions tel qu'un réservoir à hydrogène à la place de batteries pour un moteur électrique ou des motorisations thermiques au BioGNV ou à l'hydrogène.

La biomasse pourrait quant à elle représenter jusqu'à 30% du mix énergétique européen d'où la question de sa production qui est un enjeu majeur, face à une demande très forte venue à la fois des secteurs de la chimie et de l'énergie.

De ces débats successivement animés par **Eric DOURNÈS**, de l'agence Créa-SUD et **Vincent BEAUFILS**, directeur de la rédaction du magazine Challenges, on retiendra que décarboner efficacement et rapidement le transport peut être réalisé grâce à un mix énergétique qui émane des territoires, dans un environnement technique de recherche mais aussi un cadre réglementaire incitatif et ouvert aux différentes solutions.

Retrouvez en ligne sur PAU-MOTORS.COM les prises de paroles de :

Maximiliane REGER et **Catherine GALANO** (Frontier Economics), **David CARPINTERO** (E Pure), **Rafik AMMAR** (Institut Européen du Methanol), **Raphael BOROUMANDO** (Docteur en économie), **Guillaume TUFFIER** (Horse, Madrid),**Christophe GRUDLER** (Député Européen), **Ivan VERA CONCHA** (TNO), **Florence DELPRAT JANNAUD** (IFPEN), **Nicolas KURTSOGLU** (SNPAA), **Alessandro FERRARI** (Haltermann Carless), **Cédric GOUBET** (Safran Helicopter Engines), **Mats HULTMAN** (NESTE), **Björn NOACK** (Robert Bosch) ...

AVIS D'EXPERT

STÉPHANE DELAGE
OPHTALMOLOGUE AU CENTRE OPHTALMOLOGIQUE LOUIS-PAUFIQUE (LYON)

« Même sans trouble, il faut surveiller régulièrement ses yeux »

Quelles sont les principales pathologies oculaires liées à l'âge ?
La cataracte est la plus fréquente : cette opacification progressive du cristallin concerne une personne sur trois après 75 ans. D'ailleurs, l'opération consistant à remplacer ce cristallin est la chirurgie la plus pratiquée en France. Vient ensuite la DMLA, qui est une diminution plus ou moins rapide de la vision centrale due à un vieillissement de la rétine : elle concerne 25 à 30 % des plus de 75 ans. Quant au glaucome, conséquence d'une augmentation de la pression dans l'œil qui détruit progressivement le nerf optique, il touche environ 10 % des plus de 70 ans.

SP

Peut-on dépister ces maladies ?
La cataracte et la DMLA provoquent des troubles visuels caractéristiques dont l'apparition peut être surveillée par un médecin généraliste ou un ophtalmologue. Le glaucome, lui, ne provoque aucun symptôme visuel au début, c'est pourquoi un dépistage systématique, surtout à partir de 40 ans, doit être réalisé par un ophtalmologue, avec, entre autres, une mesure de la pression intra-oculaire. Même si vous ne souffrez d'aucun trouble visuel, il est vivement conseillé de faire une visite de contrôle chez un ophtalmologue tous les deux à trois ans à partir de 40 ans, et tous les ans après 65 ans. ■

Propos recueillis par É. G.

3 Quelles solutions pour ralentir l'évolution de la myopie ?

La myopie est le trouble visuel le plus fréquent. En France, elle touche 20,5 % des enfants et 37 % des adultes. Et sa prévalence connaît une évolution galopante. Depuis quelques années, il existe différents moyens de ralentir sa progression chez les enfants : on parle de « freination » de la myopie. Il s'agit par exemple de verres spécifiques qui, en agissant sur la vision centrale mais aussi périphérique, limitent la déformation de l'œil à l'origine de la myopie. Ils ralentiraient d'environ 60 % la vitesse d'évolution de ce trouble. Autre solution : des lentilles freinatrices de jour qui fonctionnent sur le même principe que les verres, ou bien des lentilles rigides à porter uniquement la nuit : celles-ci modifient la forme de l'œil et évitent au patient d'avoir à porter des verres correcteurs le lendemain (on parle d'orthokératologie). Enfin, plusieurs études ont montré que l'instillation chaque soir avant de dormir d'un collyre à base d'atropine, une substance qui bloque l'accommodation et dilate la pupille, a le pouvoir de freiner l'évolution de la myopie chez les enfants. C'est le seul traitement freinateur qui soit pris en charge par l'Assurance-maladie.

4 Les presbytes peuvent-ils porter des lentilles ?

Les lentilles progressives, qui permettent d'avoir une bonne vision de près et de loin, sont adaptées aux personnes souffrant de presbytie (perte progressive de la vision de près survenant essentiellement avec l'âge). Les plus utilisées sont les lentilles souples dites multifocales : elles sont composées de différentes zones correctrices concentriques : le centre de la lentille permet la vision de près, et les cercles extérieurs favorisent la vision de loin.
Il existe également des lentilles rigides dites segmentées, qui fonctionnent sur le même principe que les verres progressifs : elles sont en général divisées en deux ou trois bandes horizontales, celle du bas étant réservée à la vision de près et celles du milieu et du haut, aux visions intermédiaires et de loin. Si l'œil bouge vers le bas pour lire un livre par exemple, la lentille remonte légèrement et la pupille se retrouve face à la bonne correction. Comme pour des verres progressifs, il faut plusieurs jours pour s'habituer à de tels dispositifs.

5 Existe-t-il des applis pour aider à prendre soin de sa vue ?

Même si passer du temps sur les écrans n'est pas recommandé, il existe aujourd'hui des applications très bien faites qui peuvent être utiles à la santé visuelle ! Il s'agit par exemple de GlassesOff, une appli mise au point par des chercheurs de l'université de Tel-Aviv (Israël) : grâce à un programme d'activités d'une dizaine de minutes par jour, elle permet de ralentir la progression de la presbytie.
OdySight, développée par des chercheurs français, propose quant à elle des tests visuels et des jeux à visée thérapeutique pour dépister la DMLA et d'autres maladies de la rétine, et en suivre l'évolution chez les personnes atteintes (disponible uniquement sur prescription médicale, l'abonnement annuel de 265 euros étant intégralement pris en charge par l'Assurance-maladie).
Enfin, la Fédération des aveugles de France a développé l'appli EyeView qui simule les conséquences des principales maladies de l'œil (DMLA, glaucome, cataracte…) grâce à la réalité augmentée. De quoi mieux appréhender les difficultés vécues au quotidien par les personnes atteintes. ■

HURTIGRUTEN EXPEDITIONS

Se perdre au milieu de la foule

RÉSERVEZ TÔT ET ÉCONOMISEZ JUSQU'À 25% + MEILLEUR PRIX GARANTI

© INGEMUND_SKALNES/DAN AVILA

Croisière All-Inclusive en Antarctique 2025/2026

À PARTIR DE :
7447€ TTC PP

Explorez les paysages épiques de l'Antarctique et rencontrez ses habitants. Vivez une expérience unique en voyageant dans un autre monde, avec nos équipes d'expédition.

Tél: 01 86 26 04 19

hxexpeditions.com/fr ou dans votre agence de voyages

Offre soumise à conditions, sous réserve de disponibilités, non rétroactive, valable sur nos croisières d'expédition pour des départs entre le 01.04.2025 et le 31.03.2026, sur la part maritime uniquement, pour toute nouvelle réservation faite jusqu'au 30.06.2024. Le montant de la remise varie en fonction de la destination, de l'itinéraire, du navire et de la date de départ. Meilleur prix garanti : si le prix du voyage, à l'identique, baisse après la réservation, nous ajusterons le solde du voyage. Cette offre est cumulable uniquement avec la remise 1893 Ambassador. Hurtigruten France SAS au capital de 40 000€ - R.C.S Paris B 449 035 005 – IM 075100037 – APST RCAPST HISCOX / 125 520.

UNE SOCIÉTÉ HURTIGRUTEN GROUP

HEMIS.FR - PHERC-PARIS-3 (INSTITUT DE FRANCE) - EDUCELAB, UNIVERSITY OF KENTUCKY

Mis au jour dans une riche villa d'Herculanum (en haut), un des 1838 rouleaux carbonisés lors de l'éruption du Vésuve en l'an 79 de notre ère (au centre), est scanné à l'université du Kentucky (États-Unis).

Herculanum

La technologie au secours des papyrus

Des outils informatiques non invasifs associés à de l'intelligence artificielle parviennent à déchiffrer les écrits anciens des papyrus d'Herculanum, rendus illisibles par l'éruption du Vésuve qui détruisit la ville romaine et sa voisine Pompéi. Retour sur cette prouesse technique qui doit beaucoup au travail collectif de chercheurs passionnés.

Par Marine Benoit

Qui aurait cru qu'il serait possible de faire revivre la seule bibliothèque complète de l'Antiquité jamais découverte ? Pas grand monde. Brent Seales, lui, y croyait. Ce qu'il n'imaginait pas en revanche, c'est qu'il mettrait plus de vingt ans à relever ce défi. En 2004, cet informaticien, enseignant-chercheur à l'université du Kentucky (États-Unis), s'est pris de passion pour les papyrus d'Herculanum, ces textes parvenus jusqu'à nous dans leur entièreté mais rendus illisibles par l'éruption du Vésuve qui ensevelit, à l'instar de Pompéi, cette ville côtière du sud de l'Italie en 79 après J.-C. Cuits par la chaleur des coulées destructrices à plus de 320 °C, ces 1838 petits rouleaux végétaux, aujourd'hui majoritairement conservés à la Bibliothèque nationale de Naples (Italie), n'ont pas été calcinés, puisqu'ils n'ont jamais été au contact des flammes. En revanche, leurs différents segments — semblables aux anneaux d'un arbre lorsque l'on regarde le rouleau dans la tranche — ont fusionné de sorte que les petits cylindres tordus sont désormais impossibles à dérouler.

Depuis leur découverte en 1752 par les ouvriers qui creusaient l'antique ville romaine — et qui les ont d'abord pris pour des morceaux de poutres brûlées ! —, nombre d'archéologues et d'érudits ont essayé de les manipuler pour les lire. Chaque tentative fut un échec qui entraîna leur destruction, partielle ou totale. Et chacun de ces échecs fut une raison de plus de penser que leur contenu resterait à jamais inaccessible. En août 2023, pourtant, Brent Seales comprit que ce précieux savoir antique était loin d'être perdu.

Un samedi soir de cet été-là, de premières lettres en grec sont déchiffrées. Ce n'est pas Brent Seales qui les lit en premier, mais un étudiant en informatique à l'université du Nebraska (États-Unis), Luke Farritor, âgé de 21 ans. Alors qu'il se trouve à une fête chez des amis, le jeune homme reçoit sur son smartphone un message d'un certain Ben Kyles, un informaticien de 45 ans originaire de Colombie-Britannique (Canada). Ben Kyles, avec qui il échange régulièrement sur un forum en ligne, lui annonce qu'il vient de réaliser de nouveaux scans d'un papyrus d'Herculanum d'une qualité sans précédent et de déposer ces images de haute résolution sur un serveur. Scanner — ou « segmenter » — un papyrus est une tâche fastidieuse : il s'agit de prendre des milliers de radiographies transversales de chaque rouleau, de haut en bas, en utilisant des clics de souris pour marquer la position changeante d'une feuille dans chaque coupe. Les algorithmes font ensuite le travail d'assemblage des différentes coupes transversales en une seule feuille.

VESUVIUS CHALLENGE -

Les caractères grecs πορφύρας, qui signifient « pourpre » (à gauche), ont été décodés par l'étudiant américain Luke Farritor. Avec deux autres étudiants, il parvient, grâce à leurs propres systèmes d'IA de détection de l'encre, à rendre lisible une grande partie du papyrus « PHerc. Paris. 4 » (ci-dessus).

Le concours Vesuvius Challenge fait avancer la recherche

Comme Ben Kyles, Luke Farritor travaille depuis plusieurs mois à la mise au point d'outils informatiques non invasifs pour déchiffrer les écrits rendus illisibles par l'éruption, et ce dans le cadre du Vesuvius Challenge. Ce concours lancé début 2023 par Brent Seales lui-même, conscient qu'il ne viendrait pas à bout de ce travail immense avec sa seule équipe, allait consister en l'attribution d'une série de prix dont les deux principaux s'élèveraient respectivement à 40 000 et 700 000 dollars. Le premier serait attribué à quiconque parviendrait à déchiffrer plus de dix caractères dans une zone de 4 centimètres carrés de papyrus ; le second, à qui réussirait à lire quatre passages de 140 caractères. Impatient, Luke Farritor accède depuis son smartphone aux images des rouleaux « dépliés » numériquement. Dans la foulée, il les soumet à son application maison dont l'IA intégrée a été, elle, programmée pour détecter de l'encre — et donc des lettres — sur la surface noircie du papyrus. Parce qu'il sait que ce travail peut prendre un certain temps, il range son téléphone dans sa poche. Mais lorsqu'il le ressort quelques heures plus tard en regagnant son logement étudiant, il se fige. L'IA a produit quelque chose. Des lettres sont apparues sur l'écran. *« Quand j'ai vu ces lettres, j'ai complètement paniqué. J'ai failli tomber à la renverse et pleurer »*, se souvient Luke Farritor. Même flous, les caractères étaient indiscutables : pi (π), omicron (ο), rho (ρ) — « πορ ». Des caractères que personne n'avait jamais relus depuis plus de deux mille ans.

Des textes relatifs à la philosophie épicurienne

Après examen, les papyrologues se rendent compte que le « πορ » découvert est le début du mot « πορφύρας », ou *« porphyras »*, signifiant « pourpre » en grec ancien. Un *« terme rare »*, selon Federica Nicolardi, papyrologue à l'université Federico II de Naples (Italie) qui a contribué à la confirmer. *« La bibliothèque grecque de la villa des Papyrus* [une villa appartenant à Lucius Calpurnius Piso Caesoninus, beau-père de Jules César, et surnommée ainsi depuis la découverte des rouleaux] *était une bibliothèque spécialisée comprenant presque exclusivement des textes relatifs à la philosophie épicurienne, mais aussi quelques ouvrages stoïciens,* explique la chercheuse. *Aujourd'hui, nous avons l'espoir — j'ose même dire la certitude — de pouvoir lire des livres entiers de l'Antiquité totalement inédits. »* La papyrologue ne croyait pas si bien dire : en avril, de larges passages décryptés sur l'un de ces fameux papyrus révéleront des détails sur la vie de Platon (*lire l'encadré ci-contre*).

FEDERICA NICOLARDI

« Nous avons l'espoir — j'ose même dire la certitude — de pouvoir lire des livres entiers de l'Antiquité totalement inédits »

Federica Nicolardi, papyrologue à l'université Federico II de Naples, en Italie

Le parchemin, en partie décrypté, pourrait être une œuvre traitant des sens et du plaisir. Dans le passage ci-contre, l'auteur évoque des adversaires qui « n'ont rien à dire sur le plaisir, ni en général ni en particulier, lorsqu'il s'agit de définition ».

De fait, au cours du Vesuvius Challenge, la prouesse suivante arrive très vite. À l'automne 2023, Youssef Nader, étudiant égyptien en sciences des données à l'université libre de Berlin (Allemagne), publie une image montrant le mot « πορφύρας » dans le contexte de quatre colonnes entières de texte. Une vue d'une qualité inégalée qu'il obtient grâce à son propre système de détection de l'encre. Youssef Nader, Luke Farritor et un étudiant en robotique suisse, Julian Schilliger, vont alors faire équipe pour être plus efficaces. À la fin de l'année 2023, tous trois parviennent à obtenir l'impensable : 2000 caractères sur quatre colonnes entières ! Le passage mis au jour représente environ 5 % du rouleau, et laisse entendre qu'il s'agit d'une œuvre philosophique inconnue traitant des sens et du plaisir. Plus précisément, il évoque la musique, le goût des câpres ou encore cette fameuse couleur pourpre, et inclut un personnage appelé Xenophantus, peut-être un joueur de flûte mentionné par les auteurs antiques Sénèque et Plutarque. Probablement écrit par Philodème de Gadara (vers 110-vers 40 avant J.-C.), adepte du philosophe athénien Épicure (341-270 avant J.-C.), il pose une question : les bonnes choses en petites quantités sont-elles plus appréciables que les bonnes choses en abondance ? Pour cette avancée historique, Youssef Nader, Luke Farritor et Julian Schilliger ont reçu en février le fameux chèque de 700 000 dollars.

Un premier pas en 2009 grâce au synchrotron de Grenoble

Leur prouesse doit aussi beaucoup à un travail collectif de longue haleine, commencé il y a près de vingt ans par Brent Seales. « *Je suis tombé amoureux des bibliothèques à l'époque où j'ai commencé à les rendre accessibles numériquement,* raconte-t-il. *J'ai vite pris conscience de l'importance de la collection d'Herculanum et du défi technique qu'elle représentait. Mais il fallait être assez fou et déterminé pour le relever.* » Après des années de travail acharné, Brent Seales et d'autres chercheurs internationaux franchissent une première étape en 2009. À partir des rayons X de l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) de Grenoble, ils obtiennent la toute première tomographie en contraste de phase d'un des papyrus, une technologie qui s'appuie

BIOGRAPHIE

Révélations sur la vie de Platon

À l'heure de sa mort, Platon (vers 427-vers 348 avant J.-C.) aurait été fortement indisposé par une flûtiste originaire de Thrace, venue alléger son agonie. Mais le philosophe n'apprécia pas et critiqua les rythmes douteux de la musicienne barbare sous les yeux d'un invité chaldéen venu de Mésopotamie. Ce détail inédit de la mort du fondateur de l'Académie à Athènes est issu d'un des 1838 rouleaux carbonisés de la villa des Papyrus sur lequel une équipe dirigée par Graziano Ranocchia, professeur à l'université de Pise (Italie), a réussi à déchiffrer plus de 1000 mots en avril. Comme la plupart des manuscrits retrouvés à Herculanum, cette « Histoire de l'Académie » est attribuée au philosophe épicurien du Ier siècle avant J.-C. Philodème de Gadara. Les caractères tracés au plomb ont pu être lus sans déplier le rouleau, en combinant la tomographie par cohérence optique et l'imagerie hyperspectrale infrarouge. Le document révèle aussi l'endroit précis où aurait été enterré Platon dans le jardin de l'Académie. Autre enseignement — à prendre avec prudence puisque le texte est postérieur de près de deux siècles à la mort de Platon : le philosophe aurait été vendu comme esclave sur l'île d'Égine en 404 avant J.-C., lorsque les Spartiates conquirent l'île. Un épisode de sa vie que les historiens situaient jusqu'ici vers 387 avant J.-C. lors d'un séjour en Sicile. Graziano Ranocchia a déjà prévu de publier la traduction du précieux texte en mai, aux éditions néerlandaises Brill. **H. J.**

sur le même principe que le scanner médical. L'appareil permet en effet de contourner le problème dont souffraient jusqu'ici toutes les tentatives de lecture par les rayons X : l'omniprésence du charbon dans les rouleaux, empêchant de distinguer l'encre elle-même, faite de suie ou de charbon de bois, du papyrus carbonisé. Deux mots et des lettres grecques sont entraperçus, mais la technique atteint vite ses limites : l'utilisation d'un synchrotron, soit d'un accélérateur de particules, est extrêmement coûteuse, et les contours des lettres encore trop incertains.

La solution se trouve du côté de l'intelligence artificielle

C'est en 2016 que Brent Seales accomplit un nouveau tour de force, cette fois sur un autre manuscrit célèbre endommagé. Il parvient à « déballer » virtuellement, grâce à la tomodensitométrie à rayons X, l'un des rouleaux carbonisés d'Ein Gedi, un des plus vieux manuscrits de la Torah (IIIe ou IVe siècle de notre ère) mis au jour en 1970 dans les vestiges d'une très ancienne synagogue en Israël. Il révèle que le rouleau contient des sections du livre du Lévitique. *« Mais l'encre d'Ein Gedi présente un avantage sur celle des papyrus d'Herculanum : elle contient du métal et brille donc fortement sur les tomodensitogrammes. Là où celle d'Herculanum est quasi invisible. Il fallait donc encore se creuser la tête »*, détaille Brent Seales. Pour l'informaticien, la solution se trouvait forcément du côté de l'intelligence artificielle. En mai 2019, il franchit ainsi une troisième étape en obtenant les scans complets et à très haute résolution de deux rouleaux grâce au synchrotron Diamond Light Source, situé dans l'Oxfordshire (Royaume-Uni). Une résolution de 8 micromètres est atteinte, soit le diamètre d'un globule rouge. À partir de là, tout était prêt pour qu'une intelligence artificielle formée à la détection de l'encre de carbone commence à être développée.

À ce jour, quatre parchemins ont été scannés en très haute résolution. En 2024, tous font l'objet d'un nouvel objectif dans le cadre du Vesuvius Challenge : la lecture de 90 % de leur contenu en s'appuyant sur l'approche du trio gagnant. Si cet objectif venait à être rempli, les quelque 600 parchemins encore jamais manipulés pourraient être déroulés à leur tour. Il faudra cependant trouver une solution moins coûteuse que la physique des hautes énergies pour les scanner. Le jeu en vaut en tout cas la chandelle : jamais un tel volume de textes anciens n'aurait été récupéré depuis la Renaissance. Plus alléchante encore est la perspective de nouvelles fouilles à la villa, dont le troisième étage est encore inexploré. ■

DÉCRYPTAGE

L'IA révolutionne la paléographie

Gain de temps, réduction des coûts de recherche, lecture des fragments fragiles et altérés ou croisement des ressources de documents dispersés dans le monde… L'intelligence artificielle va permettre aux épigraphistes et paléographes de percer les secrets persistants d'un bon nombre de textes anciens. Universités et sociétés privées ont ainsi commencé à développer des programmes réservés à des missions de décryptage bien précises :

CUNÉIFORME. À l'université Louis-et-Maximilien de Munich (Allemagne), une IA a été entraînée à la lecture des tablettes cunéiformes de Mésopotamie, dont une immense partie n'a jamais été traduite faute de spécialistes (sur 300 000 tablettes retrouvées, on estime que seules 30 000 ont été retranscrites). 300 000 lignes de texte, pour la plupart inédites, feront prochainement l'objet d'une publication numérique, la plus grande dans l'histoire des études cunéiformes.

AKKADIEN. Les universités d'Ariel, en Cisjordanie, et de Tel-Aviv, en Israël, ont mis au point The Babylonian Engine, un réseau neuronal capable de traduire l'akkadien en anglais tant à partir de translittérations de textes originaux que de symboles cunéiformes.

GREC ANCIEN. Conçu par Google DeepMind, Ithaca, entraîné sur près de 80 000 inscriptions grecques anciennes, est un réseau neuronal profond capable de restaurer par déduction du texte manquant ou endommagé, mais aussi de déterminer l'origine géographique d'un fragment ou sa datation à 30 ans près.

UNIVERSITY OF KENTUCKY

« L'encre des papyrus d'Herculanum est quasi invisible. Il fallait donc encore se creuser la tête »

Brent Seales, informaticien, enseignant-chercheur à l'université du Kentucky (États-Unis)

Japon | EXPO 2025

OSAKA

L'EXPOSITION UNIVERSELLE | 2025

« CONCEVOIR LA SOCIÉTÉ DU FUTUR, IMAGINER NOTRE VIE DE DEMAIN »

3 DÉPARTS
DU 16 AU 23 AVRIL, DU 13 AU 20 JUILLET
DU 21 AU 28 SEPT.

8 JOURS / 6 NUITS
A PARTIR DE 4 590 € / PERS. (1)

AVEC LA PARTICIPATION EXCLUSIVE DE (2)
DOMINIQUE LEGLU, Directrice éditoriale de SCIENCES et AVENIR
et **MME CECILE ASANUMA BRICE***, Chercheuse en sociologie urbaine

L'IMMENSE TOKYO, LA MERVEILLEUSE KYOTO ET L'ÉTOURDISSANTE EXPOSITION UNIVERSELLE D'OSAKA

C'est à la découverte des richesses du pays du Soleil Levant que vous invite ce voyage de Tokyo à la merveilleuse Kyoto, en passant par Osaka. Avec l'intervention, lors de notre visite au Pavillon français de l'exposition universelle, d'une conférencière de tout premier plan, **Mme Cécile Asanuma Brice***, du CNRS, qui réside au Japon depuis plus de vingt ans. Lors de deux journées entières à Tokyo, nous découvrirons le cœur historique de la ville impériale, le quartier populaire d'Asakusa, et l'immensité de la métropole avec ses 37 millions d'habitants. En montant à la spectaculaire tour Skytree, conçue par l'architecte Kiichi Sumikawa, c'est un panorama à 360°, au-delà de tous les buildings, qui s'offre à tous... Deux journées prévues à Osaka permettront ensuite non seulement de visiter le pavillon français - mais de nombreux autres pavillons de cette exposition universelle réunissant pas moins de 160 pays, sur le thème « Concevoir le futur, imaginer notre vie de demain ». Thème particulièrement évocateur pour Sciences et Avenir - La Recherche et tous ceux qui se passionnent pour l'évolution actuelle de l'Asie. Nous pourrons ensuite visiter quelques merveilles de Kyoto classées au patrimoine de l'Unesco, dont le Pavillon d'Or, deux fois ravagé par des incendies mais reconstruit. Et le temple bouddhiste Ryoan-J, au pied de la montagne Kinugasa-yama, à l'extraordinaire jardin de pierres. Sans négliger des déjeuners et dîners permettant d'apprécier de délicieux sushis, l'émerveillement est garanti.

Dominique LEGLU

Dr Dominique Leglu, directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche, pôle Sciences du groupe Challenges.

Mme Cécile Anuma Brice, chercheuse en sociologie urbaine.

UN ÉVÈNEMENT EXCLUSIF

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

MYCOMM.

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur
pavillonfranceosaka2025.mycomm.fr/sav
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | experiences@mycomm.fr

(1) Voir détails sur la brochure (2) Sous réserve de disponibilité * Intervenante présente qu'en avril et en septembre

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

Graph. Atelier Pascale M (26) Montage photos : Japonaise Freepik / Torii : Rafael Hoyos Weht Unsplash

Les belles lames de la Renaissance

Un archéologue français a enquêté sur une série de couteaux à manche ornementé qui marquent, au début du XVIe siècle, un développement des arts de la table. Des signes ostensibles de richesse qui ont aussi été découverts au Canada, dans le sillage de l'explorateur Jacques Cartier.

Que sont donc ces étranges couteaux à manche décoré d'un motif foliacé qu'il voit passer sous ses yeux depuis des années ? Cette question, l'archéologue Jean Soulat se l'est posée dès le début des années 2010 dans les locaux du laboratoire privé pour lequel il officie à Fleurance (Gers) : le LandArc, spécialisé dans l'étude de petits mobiliers en métal, en matière dure animale, en verre et en terre cuite, datés autant de l'Antiquité tardive que de la période moderne. *« J'ai commencé à m'interroger sur ces couteaux assez singuliers lorsque je me suis rendu compte que ces derniers revenaient régulièrement entre mes mains »*, explique le chercheur qui manipule et expertise au quotidien des objets archéologiques dès leur sortie de fouille, pour le compte d'acteurs tant privés que publics. *« J'ai constaté qu'ils étaient très peu présents dans la bibliographie, alors je me suis lancé dans des travaux de recherche. »* Son enquête va le mener, une bonne dizaine d'années plus tard, à plus de 4000 kilomètres de sa paillasse, sur les traces de l'explorateur français Jacques Cartier qui, en accostant en 1534 sur une plage du golfe du Saint-Laurent, révéla à l'Europe l'existence d'une terre qu'il nomma Canada *(lire l'encadré p. 84)*.

En 2014, Jean Soulat consacre à ces ustensiles, dont il estime la date de production entre la fin du XVe siècle et la première moitié du XVIe siècle, une première étude dans laquelle il parvient à démontrer que leurs mitres ornementales — les parties métalliques qui décorent les extrémités du manche — étaient interchangeables et pouvaient être associées à différents modèles. *« Ils marquaient indéniablement une mode et un usage liés au développement de l'art de la table en France, à la Renaissance, chez les élites. J'ai découvert que ces couteaux de table, diffusés un peu partout en*

R. GARNIER

« Leur travail ornemental pourrait refléter la signature d'une production française du début du XVIe siècle »

Jean Soulat, archéologue, responsable de l'étude de la culture matérielle au laboratoire LandArc

Offert à Charles Quint au cours d'un voyage en Italie, ce couteau en manche d'ébène porte, gravé sur la mitre en laiton, le millésime « 1532 ».

AKG IMAGES

L'art de la table se développe à la Renaissance en France parmi les élites, et avec lui les couteaux de table ornementés (ici, « Banquet » de Lucas van Valckenborch, peint vers 1580).

Europe, étaient individuels et personnels, chaque convive apportant le sien lors du dîner », détaille le chercheur. En effet, le passage du Moyen Âge à la Renaissance s'accompagne d'un changement flagrant dans la culture matérielle tout entière : des accessoires vestimentaires — les collerettes, les chapeaux ou encore les boutons apparaissent — à la façon de ferrer les chevaux, l'apparence et la place accordées aux objets évoluent de concert avec les événements qui font, à cette époque, bouger le monde. « *L'Europe est puissante, les grands explorateurs ont déjà bien sillonné les mers et les colonies d'Amérique commencent à se mettre en place,* contextualise le chercheur. *À cette époque, les couches les plus aisées de la population prennent goût à l'art de recevoir. On voit apparaître de grands verres à pied, de la vaisselle précieuse, mais aussi ces couteaux personnels qui peuvent être décorés de manière détaillée avec l'intention d'épater son hôte.* »

En 2020, Jean Soulat consacre aux mystérieux couteaux un deuxième article qui s'intéresse spécifiquement à un type de manche riveté avec un ornement qui rappelle un brin de muguet. Au total, 18 couteaux présentant un manche de ce type sont recensés, la majorité n'ayant malheureusement pas conservé leur lame (seuls six l'ont encore). Six exemplaires proviennent de la moitié nord de la France (Île-de-France, Pas-de-Calais, Bretagne et Grand Est). Cinq autres ont été retrouvés en dehors de l'Hexagone : un premier à Namur, en Belgique, deux à Solingen, en Allemagne, et un autre dans l'épave du *Mary Rose*, célèbre navire coulé en 1545 dans le Solent, bras de mer entre l'île de Wight et le Hampshire (Royaume-Uni). Un dernier enfin, dont on ignore la provenance, se trouve dans les collections du Rijksmuseum d'Amsterdam, aux Pays-Bas. Selon les archives, il faisait partie d'un lot offert à l'empereur Charles Quint avec trois autres couteaux et une fourchette. « *La notice du musée nous dit qu'il aurait été fabriqué en Italie en 1532, sans donner plus de détails. Cette date est indiscutable, puisque ce millésime est gravé sur la mitre en laiton de la lame.* » Les couteaux du Rijksmuseum et de l'épave du *Mary Rose* ont donc un avantage de taille : ils apportent la preuve irréfutable que ces ustensiles ont bien été fabriqués dans la première moitié du XVI^e^ siècle, voire plus tôt, mais certainement pas après.

LISZT COLLECTION/AKG IMAGES

Deux exemplaires retrouvés à plus de 4000 km de la France

Concernant leur fabrication, Jean Soulat en arrive à la conclusion que ces couteaux auraient pu être produits dans le nord de la France, puisque sur les 18 exemplaires inventoriés, sept proviennent des Hauts-de-France, dont cinq de la région picarde (Beauvais, Couloisy, Coucy et Laon). « *Leur travail ornemental pourrait refléter la signature d'une production française du début du XVI^e^ siècle localisée dans le nord du Bassin parisien, mais cela reste évidemment une hypothèse* », assure-t-il. Il se pourrait également que les lames seules aient été fabriquées dans la ville de Solingen, en Allemagne, grande spécialiste de la forge de lames dont on sait que la production a été diffusée à cette période dans toute l'Europe.

À ce stade de son travail, l'archéologue est satisfait. Il a pu documenter

un type d'objets qui jusqu'ici était resté dans l'ombre, qui plus est possédé par les puissants du monde de l'époque, comme le prouve l'exemplaire qui aurait appartenu à Charles Quint. Il n'imaginait pas qu'à peine quelques mois plus tard, il allait en retrouver deux nouveaux exemplaires à plus de 4000 kilomètres de leur supposé lieu de production. *« Dans le cadre d'un tout autre travail de recherche, je suis tombé sur les résultats de fouilles anciennes menées dans les années 1970 et 1980 dans l'est du Canada. L'une à Avonport, en Nouvelle-Écosse, l'autre sur l'île Saddle, dans la province de Terre-Neuve-et-Labrador. Toutes deux avaient révélé la présence d'un couteau à manche à décor stylisé en "brin de muguet".* » Le premier, trouvé à Avonport, avait été déposé dans la tombe d'une princesse amérindienne de la tribu des Micmacs avec de nombreux autres objets, parmi lesquels 3000 perles, une dague, une marmite, un fer de hache et une trentaine d'autres couteaux. Mais que pouvait bien faire là le fameux couteau français à manche décoré d'un brin de muguet ?

NOVA SCOTIA MUSEUM, J. SOULAT

Mis au jour à Avenport (Nouvelle-Écosse, Canada), dans la tombe d'une princesse micmac, ce manche de couteau en bois de 77 mm de long présente un décor stylisé en « brin de muguet » . Il pourrait être arrivé avec l'équipage de Jacques Cartier.

Tout aussi surprenante que sa présence, la datation de la tombe, effectuée d'après l'étude typochronologique des perles : la princesse aurait été enterrée entre la fin du XVIe siècle et le début du XVIIe siècle, soit plus d'un demi-siècle au moins après la fabrication du couteau. *« Plusieurs objets anciens ont été déposés volontairement dans la sépulture aux côtés d'autres contemporains de l'inhumation, comme les perles. Il s'agissait d'un geste fort pour la famille, à la valeur symbolique indéniable »*, assure Jean Soulat. Pour le chercheur comme pour ses confrères canadiens, ce couteau a probablement joué un rôle particulier dans les relations entre les colons français et basques et les populations locales, dans le cadre de la traite de fourrures. *« Il a pu être transmis au sein d'une même famille de colons, voire être échangé avec les Micmacs afin d'assurer une bonne entente. Le fait qu'il ait été conservé longtemps montre en tout cas qu'il avait une valeur affective »*, ajoute l'archéologue.

Des objets parmi les plus anciens découverts sur le sol canadien

Le second couteau, celui de l'île Saddle, au sud de Red Bay, a été trouvé lors de fouilles menées entre 1978 et 1992 sur une tonnellerie occupée par les Basques entre les années 1543 et 1575, voire jusqu'en 1625. *« Dans ce cas-là, difficile de comprendre le parcours de ce couteau réservé à une élite jusque dans ce petit coin crasseux en bord de mer. C'est un lieu où l'on fabrique des tonneaux, et donc un lieu fréquenté par des gens vraiment modestes »*, détaille Jean Soulat. Quelle que soit leur histoire, aujourd'hui impossible à retracer avec certitude, ces deux couteaux comptent indéniablement parmi les objets français les plus anciens jamais retrouvés sur le sol canadien. Une découverte rare, tant l'identification outre-Atlantique des objets de la première moitié du XVIe siècle s'avère délicate. ■

Marine Benoit

EXPÉDITIONS

La découverte du Canada par les Français

C'est à Jacques Cartier, navigateur de Saint-Malo, que l'on attribue la découverte du Canada, en 1534, pour le compte du roi de France François Ier. Le monarque lui confia pour mission de trouver des richesses (or, diamants, épices…) en Nouvelle-France et, surtout, d'identifier un accès vers l'Asie qui, dans l'imaginaire collectif, regorgeait également de trésors. Trois voyages furent ainsi organisés — en 1534, 1535 et 1541 —, au cours desquels Jacques Cartier et son équipage entrèrent en contact avec les Amérindiens de la nation Micmac et les Iroquois du Saint-Laurent. Si Jacques Cartier est le premier Européen à cartographier et documenter ces régions, jetant ainsi les bases des revendications territoriales françaises en Amérique du Nord, ses trois expéditions furent considérées comme des échecs, les matières précieuses tant fantasmées n'ayant jamais été rapportées. Parce que leurs relations avec les Amérindiens finirent par se dégrader, les Français décidèrent de quitter le Canada en 1543 et d'abandonner toute velléité coloniale. Ils n'y reviendront qu'au début du XVIIe siècle, avec Samuel de Champlain.

48H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

LE FESTIVAL

GRAND OCEAN

13-14 SEPTEMBRE 2024

À LA CITÉ DE LA MER,
CHERBOURG-EN-COTENTIN

& EN DIGITAL

Conférences & débats portés par les plus grands spécialistes, animations ludiques & immersives... nous accueillons petits et grands pour une plongée unique au cœur des océans.

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

Cherbourg en Cotentin · leCotentin Communauté d'agglomération · Terre bleue Le Cotentin · Région Normandie · La Manche Le Département

Organisé par

Les Echos Le Parisien Événements · Sciences Avenir La Recherche

Les pionniers de la télégraphie céleste

Dès le début du XIXe siècle, des savants ont imaginé des dispositifs pour communiquer avec d'éventuels voisins extraterrestres. À ces premiers projets, jamais mis en application, succéderont d'autres au tournant du XXe siècle, comme l'envoi de signaux lumineux.

Par Florence Raulin Cerceau

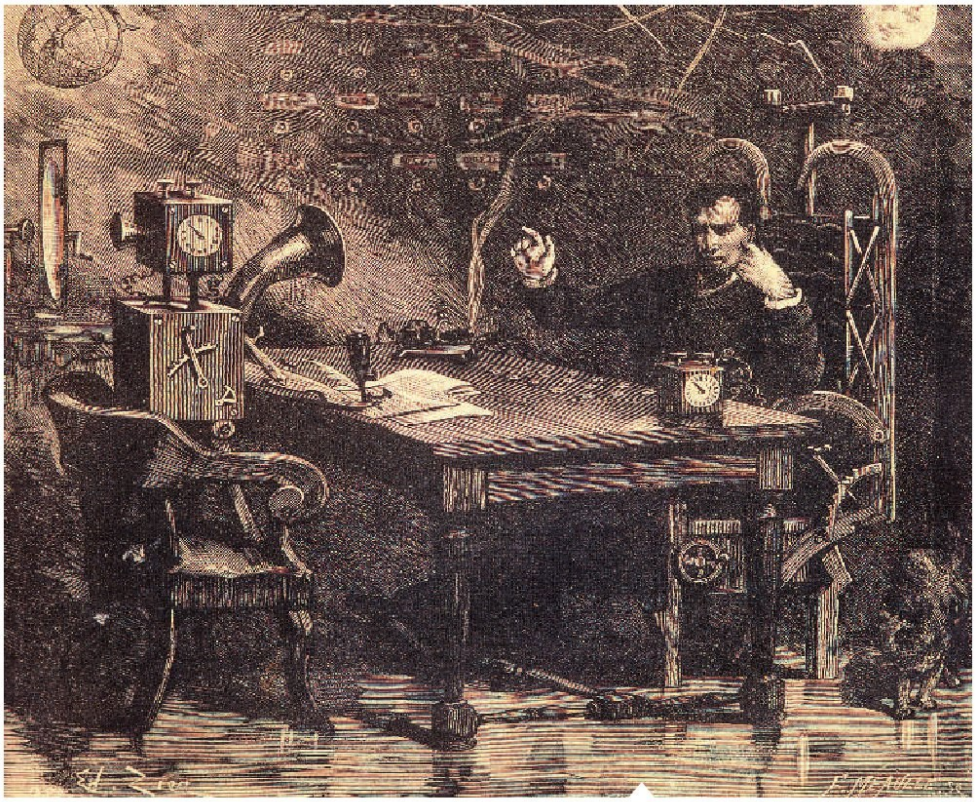
Si d'autres civilisations existent dans la galaxie, comment pourrions-nous communiquer avec elles ? Cette question a été soulevée en 1959 par l'Américain Philip Morrison et l'Italien Giuseppe Cocconi dans un article préconisant l'utilisation des ondes radio pour les communications interstellaires. Les deux physiciens pensaient qu'il était temps de prendre en considération la recherche de signaux d'autres « intelligences » dans la galaxie. Et, bien que la probabilité de réussite soit difficile à estimer, ils concluaient : *« Si on ne cherche jamais, la probabilité de réussite est assurément zéro »*. Une première expérience est commencée en 1960 par l'astrophysicien américain Frank Drake sous le nom de projet Ozma. Il s'agissait de cibler deux étoiles faisant partie de la liste proposée par Philip Morrison et Guiseppe Cocconi pour une écoute d'éventuels signaux artificiels autour de la raie spectrale de l'hydrogène. Cette tentative est restée sans résultat probant, mais l'article comme l'expérience sont devenus historiques et marquent le début d'une discipline consacrée à l'écoute des étoiles, nommée Seti (Search for extraterrestrial intelligence).

GETTY IMAGES

Astrophysicienne et exobiologiste de formation, Florence Raulin Cerceau est historienne des sciences au centre Alexandre-Koyré, à Paris.

Cependant, bien avant Seti, d'audacieux projets ont été élaborés pour tenter d'entrer en communication avec d'autres « intelligences », supposées habiter sur la Lune, Mars ou Vénus. Dans le courant du XIXe siècle, cela paraissait à certains tout à fait réalisable. Le mathématicien allemand Carl Gauss serait le premier à avoir fait une proposition de cet ordre dans les années 1820. Le concept de base était de pouvoir être *« vus »* depuis la Lune, en tant que Terriens connaissant les mathématiques. Carl Gauss suggérait d'utiliser le théorème de Pythagore, à une échelle telle que les figures associées auraient pu être observées par les habitants de la Lune : d'immenses rangées de pins auraient dessiné les contours d'un triangle rectangle géant et de trois carrés dans la toundra sibérienne, l'intérieur de ces figures étant rempli de blé ou de seigle.

Un deuxième projet datant de 1840 est généralement cité, bien que les sources soient incertaines. L'auteur en serait l'astronome Joseph Johann von Littrow, directeur de l'observatoire de Vienne (Autriche). Son idée était d'utiliser pendant la nuit le désert du Sahara comme un gigantesque



COLL. MAISON D'AILLEURS / AGENCE MARTIENNE

L'inventeur français Charles Cros (1842-1888) avait imaginé envoyer de puissants signaux lumineux en direction des planètes voisines de la nôtre afin d'entrer en communication avec d'autres « intelligences ».

Charles Cros a parfaitement saisi que la répétition des séries de flashs ainsi que leur rythme seraient une condition indispensable pour confirmer la nature artificielle du signal

tableau noir. À cette fin, d'immenses canaux de 30 kilomètres de diamètre seraient remplis tout d'abord d'eau, puis de kérosène, lequel serait enflammé afin d'indiquer notre présence aux habitants de la Lune et des plus proches planètes.

Vaincre les distances interplanétaires grâce aux nouvelles techniques

Ces tout premiers projets de communication n'ont jamais été mis en application. Sans doute était-il laborieux d'utiliser la surface de la Terre comme une immense feuille de papier ! L'ère pionnière la plus prolifique pour ce genre très spécial de communication arrive quelques décennies plus tard. Dans la seconde moitié du XIXe siècle, alors que la télégraphie électrique s'étend sur toute la planète et que la surface martienne intrigue les astronomes, l'idée d'une « télégraphie céleste » fait son chemin. L'inventeur français Charles Cros est persuadé que l'on peut vaincre les distances interplanétaires, grâce aux nouvelles techniques, pour dialoguer avec les autres planètes. Son « Étude sur les moyens de communication avec les planètes », publiée en 1869, montre comment communiquer avec nos planètes voisines Mars ou Vénus à l'aide de sources lumineuses très puissantes. Ces dernières seraient focalisées sur un miroir parabolique, puis renvoyées vers la planète cible de manière à l'envelopper complètement. Ainsi, les habitants présumés de la planète verraient d'où proviendrait le faisceau de lumière, c'est-à-dire de la Terre. Enfin, pour bien faire comprendre la signature « non naturelle » du message, Charles Cros suggère de répéter périodiquement les flashs lumineux, les intervalles entre chaque flash ayant aussi une signification. Les modifications du signal, grâce à l'utilisation de rythmes et d'intermittences, conforteraient l'origine « intelligente » du message. Il explique également que « *la première notion à échanger est celle d'une numération* ». Aussi, propose-t-il de transmettre en premier des séries numériques simples faites de trois signes élémentaires (l'éclair simple, double ou triple), une sorte de code rendant compréhensible la suite du message. Les séries numériques se feraient par la suite de plus en plus complexes, pour être finalement traduisibles en lignes constituées de points de deux

couleurs. Ces lignes, une fois empilées, formeraient des figures : *« La transmission des éclairs rythmés est donc ainsi ramenée à une transmission de dessins, de projections planes »*, nous explique Charles Cros. Il espérait là avoir mis au point un langage universel basé sur les mathématiques. Ce qui est extrêmement novateur dans ce projet est non seulement sa réflexion sur un langage universel, mais aussi son ébauche de « tutoriel » en début de message. Enfin, l'inventeur a parfaitement saisi que la répétition des séries de flashs ainsi que leur rythme seraient une condition indispensable pour confirmer la nature artificielle du signal.

La télégraphie céleste a fait l'objet d'autres projets au tournant du XXe siècle, chez certains savants comme le Britannique Francis Galton (cousin de Charles Darwin) ou l'Américain William Henry Pickering. L'astronome Camille Flammarion, quant à lui, estimait que le meilleur langage pour dialoguer avec nos voisins planétaires était la géométrie. On retiendra la contribution d'un astronome amateur méconnu, A. Mercier (de prénom inconnu), membre de la Société astronomique de France, qui publie en 1899 un livret intitulé *Communications avec Mars*. Il y prône la télégraphie céleste, comme Charles Cros, mais avec l'usage d'installations très ambitieuses telles celles de réflecteurs au sommet de la tour Eiffel. Une autre proposition étonnante nous vient du physicien serbo-américain Nikola Tesla. Célèbre pour ses inventions concernant l'électricité, il est moins connu pour ses recherches sur les moyens de communiquer avec Mars. Une nuit de 1899 où le physicien se trouve seul dans son laboratoire de Colorado Springs (États-Unis), d'étranges perturbations se produisent lors de ses expériences sur les décharges électriques. Les changements qu'il note ont lieu périodiquement, avec une apparence d'ordre et de nombre inhabituelle. Sur le coup, l'idée de signaux provenant d'intelligences extraterrestres ne se présente pas à lui. C'est un peu plus tard, ayant écarté l'hypothèse de sources naturelles, qu'il lui vient à l'esprit que ces étranges *« actions électriques périodiques »* pourraient être des signaux intentionnels provenant d'une autre planète. Pour lui, il ne peut s'agir que de la planète Mars.

Nikola Tesla, pour qui la vie sur d'autres planètes est une certitude, se lance alors dans une réflexion sur la communication interplanétaire, mais remet en cause la télégraphie céleste par signaux lumineux proposée par ses prédécesseurs. Son projet était de construire une machine capable d'envoyer de l'énergie électrique en quantité considérable afin d'adresser des messages vers les habitants de Mars. Mais son *« appareil pour les communications interplanétaires »*, dont il parlera encore quarante ans après, ne verra jamais le jour…

ROGER RITJA / BIOSPHOTO

L'organisation Meti, fondée en 2015, transmet des messages dans l'espace à destination d'éventuelles vies extraterrestres (ici en 2018 depuis la station de l'Eiscat, en Norvège).

Les projets actuels s'étendent aux étoiles de la galaxie

Ces projets pionniers n'ont cependant pas de relation, semble-t-il, avec l'ère Seti qui se développera à partir des années 1960. Ils n'ont d'ailleurs pas la même intention, puisque le but des pionniers est de se signaler auprès de nos voisins planétaires, alors que Seti concerne l'écoute (passive) de signaux éventuels émanant d'autres systèmes planétaires. Les pionniers s'apparentent davantage au programme « Seti actif » ou encore à Meti (Messaging extraterrestrial intelligence). De plus, les échelles ne sont pas du tout les mêmes, puisque les projets pionniers concernent les planètes voisines, alors que Seti ou Meti s'appliquent aux étoiles de la galaxie. En revanche, hormis leur côté extrêmement novateur pour l'époque, ils nous révèlent la fascination de leurs auteurs pour un éventuel « dialogue » avec d'autres planètes. Ils nous incitent aussi à défier les distances pour pouvoir conclure comme disait Charles Cros : *« L'éternel isolement des sphères est vaincu. »* ■

COMMUNICATIONS INTERPLANÉTAIRES

Un prix spécialement créé à l'Académie des sciences

Après presque dix ans d'hésitation, l'Académie des sciences acceptait le legs de 100 000 francs proposé en 1891 par Clara Goguet, en hommage à son fils Pierre. Admiratrice de Camille Flammarion, Clara Goguet avait rédigé un bien curieux testament astronomique, décernant le prix Pierre-Guzman à celui qui entrerait en communication avec une planète, excepté la planète Mars (jugée trop facile à contacter !). Les communications interplanétaires ne paraissaient donc pas complètement farfelues aux yeux de l'Académie des sciences. Mais il faut mentionner que Clara Goguet avait prévu que ce prix ne soit pas décerné tout de suite. Aussi, jusqu'à ce qu'il soit gagné, elle souhaitait que les intérêts du capital, cumulés sur cinq ans, forment un prix (toujours sous le même nom) récompensant un progrès important en astronomie. Le prix Pierre-Guzman aurait été convoité par Nikola Tesla pour ses travaux sur la communication interplanétaire.

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 90

▶ C'est à voir
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Le ciel du mois
p. 97

▶ Jeux
p. 98

DESIGN CELLS/SPL/SUCRÉSALÉ

Le cerveau traite et organise en véritables « cartes d'identité » les odeurs que nous respirons.

La science des odeurs

Dans son essai « Sentir », le spécialiste des neurosciences Hirac Gurden explore avec un vrai talent de vulgarisateur les mécanismes de l'odorat.

SENS *« L'odeur, c'est la vie. »* Ce sont les réactions chimiques du métabolisme qui génèrent nos odeurs corporelles, qu'elles soient agréables ou non. Sans métabolisme, point d'odeur. Et en l'absence d'odeur, on se sent vite coupés du monde, en perte de connexion avec la vie même et avec l'ensemble des souvenirs que les parfums ont ancrés en nous : cela explique la souffrance qu'expérimentent les personnes anosmiques, privées de cette capacité sensorielle vitale.

Directeur de recherche en neurosciences au CNRS, Hirac Gurden révèle, dans cet essai intitulé sobrement *Sentir*, un vrai talent de vulgarisation doublé d'un art de la narration. Les effluves aromatiques du café sont constitués d'un millier de molécules odorantes, que notre perception olfactive synthétise grâce à un mouvement en trois temps : détection, codage, et sollicitation des zones cérébrales concernées par la mémoire (parmi lesquelles l'hippocampe) ou les émotions. Et c'est notre bulbe olfactif, doté de millions de neurones, qui trie et organise ces informations en de véritables *« cartes d'identité des odeurs stockées dans notre mémoire »*, détaille l'auteur.

Il souligne aussi les étapes significatives d'une histoire des odeurs marquée à ses débuts par des liens avec la pharmacie et la médecine. Car si les parfums procurent du plaisir, ils soigneraient en même temps. Bonaparte raffolait d'eau de Cologne, qu'il buvait pour soulager son estomac ! Un lien que l'on retrouve dans les jardins des senteurs thérapeutiques, créés pour favoriser la stimulation sensorielle des malades d'Alzheimer. Voilà en tout cas dans cet ouvrage de quoi réhabiliter un sens que Freud aura dénigré puisque… trop animal à ses yeux. ■

Andreina De Bei

Sentir. Comment les odeurs agissent sur notre cerveau, Hirac Gurden, Les Arènes, 252 p., 21 €

Poésie cosmique

DIALOGUE Décidés à partager *« le gai savoir cosmologique »*, Michel Cassé et Joseph Silk, éminents astrophysiciens, évoquent les théories les plus récentes de la physique. Envolées lyriques et parfois surréalistes se succèdent pour évoquer le modèle standard des particules, la matière noire ou l'inflation cosmique grâce à la fable *« La grenouille qui se veut faire aussi grosse que le bœuf »* de La Fontaine. On ne comprend pas toujours, mais la poésie de cet ouvrage, qui exhorte *« à vaincre notre peur du vide quantique »*, est indéniable. **F. N.**

Au croisement des univers parallèles, Michel Cassé et Joseph Silk. Odile Jacob, 224 p., 23,90 €

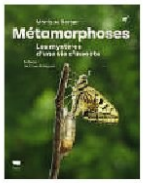
La fin du tout-béton

BD Incontournable de notre monde moderne, le béton pose de sérieux problèmes : sa fabrication nécessite des dizaines de milliards de tonnes de sable chaque année, et elle est bien plus émettrice de CO_2 que… le trafic aérien. Mais les alternatives à ce matériau sont à portée de main — comme la terre, la pierre, le bois ou la paille — et les nouvelles générations d'architectes s'en emparent de plus en plus. C'est tout l'objet de cette bande dessinée passionnante, une enquête dénonçant cet univers impitoyable. **L. L.**

Béton. Enquête en sables mouvants, Alia Bengana, Claude Baechtold, Antoine Maréchal, Presses de la cité, 160 p., 24 €

Microcosmos

INSECTES Disparue en 2023, Monique Berger était une photographe de la biodiversité : celle des lointains horizons d'abord, puis celle de son jardin. Elle se prend alors de passion pour les insectes, qu'elle traque aussi dans la forêt de Fontainebleau où elle peut rester à l'affût des heures durant. En réunissant plus de 500 de ses clichés, ce livre donne à voir des tranches de vie d'insectes et les phases de transformation qui s'opèrent entre l'œuf et le papillon, le ver luisant, la libellule, la coccinelle… en passant par l'état de chenille ou de larve. Captivant ! **S. R.**



Métamorphoses, Monique Berger, Delachaux et Niestlé, 208 p., 35,50 €

Repousser les limites de la vieillesse

MODE DE VIE Plus de cent ans en bonne santé sont à notre portée ! C'est la promesse faite par Jean-Marc Lemaître, directeur de recherche à l'Inserm. Après *Guérir la vieillesse*, l'expert compile les données les plus récentes sur la biologie du vieillissement et les pistes pour en repousser les limites *(lire* S. et A. *n° 926)*. Des enquêtes menées au Japon, en Sardaigne, en Grèce ou au Costa Rica, où se trouve une concentration remarquable de supercentenaires, ont permis d'identifier les modes de vie les plus sains. **H. J.**

Décider de son âge, Jean-Marc Lemaître, Allary Éditions, 288 p., 21,90 €

Informaticienne réhabilitée

PIONNIÈRE Alice Recoque a bien failli avoir sa page Wikipédia supprimée quand un contributeur de l'encyclopédie en ligne a douté *« qu'elle soit une scientifique ou industrielle très reconnue dans le domaine de l'architecture des ordinateurs »*. Or, elle est une figure clef de l'informatique française. Le livre de Marion Carré, cofondatrice de la start-up d'intelligence artificielle (IA) conversationnelle Ask Mona, n'est pas une simple biographie. Le parcours d'Alice Recoque est certes retracé, de son diplômé de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI) en 1954 à ses travaux sur des ordinateurs emblématiques du début de l'informatique française, le CAB500 et le Mitra15. Sans oublier ses recherches en IA, préfigurant tout ce dont on parle aujourd'hui. Mais Alice Recoque a aussi subi tous les mécanismes qui mènent à l'invisibilisation des femmes scientifiques, chercheuses, pionnières dans leurs domaines, et empêchent leur reconnaissance au-delà d'un public d'initiés. Ce livre répare les torts. ■ **Arnaud Devillard**

Qui a voulu effacer Alice Recoque ? Marion Carré, Fayard, 250 p., 20 €

Invasions pacifiques

FLORE Les plantes dites invasives ont d'abord été collectées avec soin dans des contrées lointaines par des marins au long cours, des botanistes ou des prêtres missionnaires. Elles ont orné les jardins de leur beauté exotique avant de faire le mur et de coloniser nos sentiers, au grand dam des défenseurs de la flore endémique. Derrière ces proliférations, il y a toujours la main de l'humain et la dégradation des milieux. La prospérité du buddleia, l'arbre à papillons qui croît dans les gravats, en est un exemple. Rapporté de Chine au XVI[e] siècle, évadé des jardins dans les années 1930, il a profité des conséquences de la Seconde Guerre mondiale en colonisant les décombres et les terrains abandonnés, grâce aux millions de graines produites chaque année par un seul plant. L'auteur raconte l'histoire de plantes tombées en disgrâce, tout en s'interrogeant sur notre volonté de maîtriser la nature. Un ouvrage captivant et bien documenté. ■ **Sylvie Rouat**

La Compagnie des invasives, Marianne Roussier du Lac, Le Pommier, 156 p., 18 €

C'EST À LIRE

Les forêts menacées

IMPACT Spécialiste de la physique de l'atmosphère et du climat, Katia Laval démontre le rôle essentiel des forêts à l'échelle locale et

régionale, et sur le climat, permettant de réduire le réchauffement global. Mais si les forêts représentent aujourd'hui 31 % des surfaces émergées, elles ont perdu depuis 25 ans une étendue de 1,3 million de km². Cela a un impact direct sur l'Amazonie, cet *« océan vert »*. L'auteure explore ainsi les conséquences complexes de l'implantation ou de la destruction de forêts sur leur environnement et sur le cycle de l'eau. Passionnant. **S. R.**

Les Pouvoirs de la forêt, Katia Laval, Odile Jacob, 160 p., 21,90 €

Artistes des glaces

PHOTOGRAPHIE Parfois, on découvre une pépite… L'objet est discret, le papier glacé, le graphisme subtil. La photo de couverture, palimpseste de transparences monochromes, dévoile des strates de montagne enneigée. Un fil chronologique relie la succession de textes et d'images : le daguerréotype de John Ruskin représentant la mer de Glace (1849 ou 1854), les *Touristes face au massif de la Bernina* de Matthieu Gafsou (2009-2012) et le photogramme d'un bloc de glace en train de fondre de Douglas Mandry (2020) témoignent d'une théorie singulière du paysage. L'auteur de cet ouvrage associe en effet photographie, glaciologie et sociologie dans une analyse structurée par l'évolution du regard des artistes. Qu'elle ait conduit à faire du glacier un sujet photographique en le magnifiant dès 1850, ou qu'elle ait servi les sciences (géologie, géomorphologie…), la photographie accompagne la connaissance de ces géants, devenus les symboles de la fin d'un monde. ■ **A. De B.**

Les Glaciers des Alpes et la photographie, Claude Reichler, Presses universitaires de Rennes, 168 p., 24,90 €

Je ne suis pas un robot

IA Prenant comme fil rouge le film culte *Blade Runner*, dans lequel les robots atteignent un degré d'humanité et de complexité très élevé — au point qu'il devient quasi impossible de les distinguer de nous —, l'auteur pose la question : la réalité peut-elle

rattraper la fiction ? En l'état actuel, sa réponse est non. Les limitations ne sont pas que technologiques, mais aussi philosophiques : a-t-on envie de robots qui nous ressemblent, dans l'apparence comme dans la capacité à maîtriser le langage, à ressentir des émotions, etc. ? Un livre fin, intelligent, divertissant. **V. G.**

Aimer un robot avec Blade Runner, Frédéric Landragin, Dunod, 172 p., 15,90 €

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

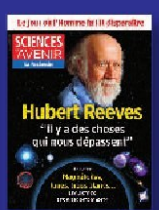
Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 920 ❑ N° 921 ❑ N° 922 ❑ N° 923
❑ N° 924 ❑ N° 925 ❑ N° 926 ❑ N° 927

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

N° 920 L'origine du temps

N° 921 Aliments et santé



N° 922 Hommage à Hubert Reeves

N° 923 L'évangile oublié qui bouleverse la Bible

N° 924 Dépression : les nouvelles pistes pour s'en sortir

N° 925 Énergie noire : la force qui déchire l'Univers

N° 926 Nouveaux traitements pour vaincre l'insomnie

N° 927 Univers : la première seconde

Auxerre (89)

Biolympiques
Des performances physiques impressionnantes… dans la nature. C'est l'angle décalé de cette exposition à l'heure des jeux Olympiques. Le guépard est champion de course, le crapaud grimpe, l'araignée fait de l'apnée… Et il est aussi question de travail d'équipe.
Muséum, 5, boulevard Vauban, jusqu'au 22 septembre. Rens. : 03.86.72.96.40.

Lausanne (Suisse)

Glaciers, un monde en mouvement
Les glaciers recouvrent 3 % de la surface de la Suisse. Leur disparition révèle leur fragilité et l'impact des activités humaines. Tableaux, ateliers interactifs, animations mettent en avant ce monde en perpétuel mouvement.
Musée de Lausanne, 4, place de la Cathédrale, jusqu'au 29 septembre. Rens. : +41.21.315.41.01.

Lyon (69)

Mondes disparus
L'aventure en réalité virtuelle, conçue pour le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, se déplace. Pendant 45 minutes, le visiteur arpente les paysages de la Terre à plusieurs périodes de son évolution.
Lire notre reportage à Paris : sciav.fr/928mondes
Centre Eclipso, 112, cours Charlemagne. Rens. : sciav.fr/928eclipso

Meaux (77)

Combattre loin de chez soi
En 1914, la France est encore une puissance coloniale. Cette exposition se consacre à la participation de cet empire, véritable réservoir d'hommes, au premier conflit mondial. Un hommage rendu autant qu'une clef d'explication du monde contemporain.
Musée de la Grande Guerre, rue Lazare-Ponticelli, jusqu'au 30 décembre. Rens. : 01.60.32.14.18.

Nantes (44)

Musée Dobrée
Ce musée d'art et d'archéologie est réparti sur trois bâtiments, dont un manoir du XVe siècle et un palais néo-médiéval. Il a rouvert mi-mai après rénovation, avec des collections comprenant 2400 objets couvrant 500 000 ans d'histoire.
Musée Dobrée, 1, place Jean-V. Rens. : 02.40.71.03.50.

Nîmes (30)

Achille et la guerre de Troie
Le musée a extrait de ses réserves des œuvres consacrées à Achille, héros de la mythologie grecque. Une mosaïque de 30 m² restaurée en 2010 sera notamment exposée pour la première fois, ainsi que quelques prêts dont le sarcophage d'Achille à Skyros.
Musée de la Romanité, 16, place des Arènes, jusqu'au 5 janvier 2025. Rens. : 04.48.21.02.10.

Paris (75)

À bras-le-corps
Une cinquantaine d'instruments scientifiques racontent l'histoire des sciences expérimentales, de la Révolution française à 1920. La biomécanique, l'électricité médicale, la mesure de la voix ou de l'audition sont à l'honneur.
Collège de France, 11, place Marcelin-Berthelot, jusqu'au 12 juillet. Entrée libre. Rens. : sciav.fr/928abraslecorps

Merveilleux trésor d'Oignies
Ces pièces d'orfèvrerie du XIIIe siècle constituent l'une des sept merveilles de Belgique, exposées habituellement à Namur (Belgique). Le trésor est présenté ici au sein d'un parcours consacré au prieuré Saint-Nicolas d'Oignies, une communauté de chanoines augustins de la fin du XIIe siècle.
Musée de Cluny, 28, rue du Sommerard, jusqu'au 20 octobre. Rens. : 01.53.73.78.00.

Toulouse (31) / Exposition

« Cathares », Toulouse dans la croisade

MAIRIE DE TOULOUSE/MUSÉE DES AUGUSTINS

Le thème du catharisme et de la résistance à l'Inquisition a servi à illustrer la lutte anticléricale au XIXe siècle, comme dans ce tableau, « l'Agitateur du Languedoc », de Jean-Paul Laurens (1887).

Ces guillemets dans le titre de l'exposition résument son parti pris. Elle se déploie sur deux sites toulousains : le musée Saint-Raymond, qui évoque la croisade du pape Innocent III contre les Albigeois au début du XIIIe siècle ; et le cloître des Jacobins, où l'on découvre « l'hérésie cathare ». *« L'hérésie est indécelable du point de vue de l'archéologie. Tout le monde est enterré de la même manière dans les sépultures »*, prévient Laure Barthet, directrice du musée Saint-Raymond. Une hérésie qui semble avoir servi de prétexte à l'Église pour asseoir son pouvoir, dans un contexte de tensions entre papauté, royauté et seigneurs locaux eux-mêmes rivaux. L'existence des cathares en tant qu'entité avec une doctrine unique est loin de faire consensus chez les historiens. Des faits scientifiques solides expliquent comment le catharisme, romantisé depuis le XIXe siècle, est devenu un enjeu idéologique, un objet de culture populaire, voire un outil de marketing régional. On admirera plus de 300 pièces d'époque : des ouvrages précieux comme la *Chanson de la croisade albigeoise* ou un impressionnant registre d'inquisition, des objets usuels qui dialoguent avec d'autres (bouclier, épée, vêtements), reconstitués le plus fidèlement possible à partir de sources écrites. ■ **Jean-François Haït**

Musée Saint-Raymond, 1 ter, place Saint-Sernin, et cloître des Jacobins, allée Maurice-Prin, jusqu'au 5 janvier 2025. Rens. : 05.61.22.31.44.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

Limiter la pollution amplifie temporairement le réchauffement

Les pollutions aux particules fines refroidissent le climat. De manière directe en faisant écran au rayonnement solaire, et indirecte en favorisant la formation de nuages ou en modifiant leurs propriétés optiques. À l'échelle globale, cet effet est estimé à environ -0,4 °C sur la dernière décennie et vient partiellement masquer le réchauffement de 1,5 °C dû aux gaz à effet de serre (dont 0,8 °C pour le CO_2 et 0,5 °C pour le méthane). Mais la concentration des aérosols a considérablement baissé depuis la fin des années 1990 en Europe et en Amérique du Nord, grâce à des politiques publiques visant à améliorer la qualité de l'air. Et les pays d'Asie du Sud-Est, l'Inde et la Chine commencent aussi aujourd'hui à adopter de telles mesures répondant à des enjeux de santé publique.

De fait, environ 400 000 décès prématurés chaque année dans le monde seraient dus aux aérosols émis par les activités humaines. Pour ces raisons, nous n'avons pas d'autre choix que de réduire les émissions d'aérosols atmosphériques, même si leur effet refroidissant s'amoindrit. Certaines régions comme l'Europe subissent dès lors un « rattrapage » de réchauffement, avec une hausse accentuée des chaleurs estivales observées depuis vingt ans environ. Pour écrêter ce réchauffement supplémentaire, il faudrait diminuer rapidement et à grande échelle les émissions de méthane, conformément aux accords de Glasgow de 2021, car les effets méthane-aérosols se compensent parfaitement. Mais objectivement, ça traîne! ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHS PAR CLAIRE MATHIEU

Moins de dispersion pour une meilleure recherche

Quand on encourage les chercheurs à s'ouvrir à l'interdisciplinarité, à former des collaborations nombreuses et variées, à participer à la diffusion des savoirs auprès du grand public et à se tourner vers l'innovation pour aider à construire une passerelle entre recherche fondamentale et applications, le métier de chercheur est profondément transformé. Il ne s'agit pas là de bureaucratie, ni d'évaluations à outrance, ni de réunionite, mais d'activités utiles et intéressantes, voire passionnantes. Cependant, ces activités ne doivent pas occulter le cœur du travail de chercheur : les temps de contemplation longue et lente d'un problème ou d'une situation qui résiste à l'analyse. Ces périodes de méditation profonde sont les clés pour faire émerger des idées nouvelles. Or, la multiplication des missions du chercheur conduit à une fragmentation de l'emploi du temps et à une dispersion de l'attention, concrétisée par l'incessant bombardement des emails. De même que pour lutter contre la multiplication désordonnée des publications, un mouvement s'est enclenché pour ne tenir compte que de quelques publications lors des évaluations des chercheurs, il serait bon de ne tenir compte que de quelques activités en dehors du cœur de la recherche pour lutter contre cette dispersion.. Cela corrigerait la tendance en encourageant une meilleure focalisation et, à terme, de meilleurs travaux de recherche. ■

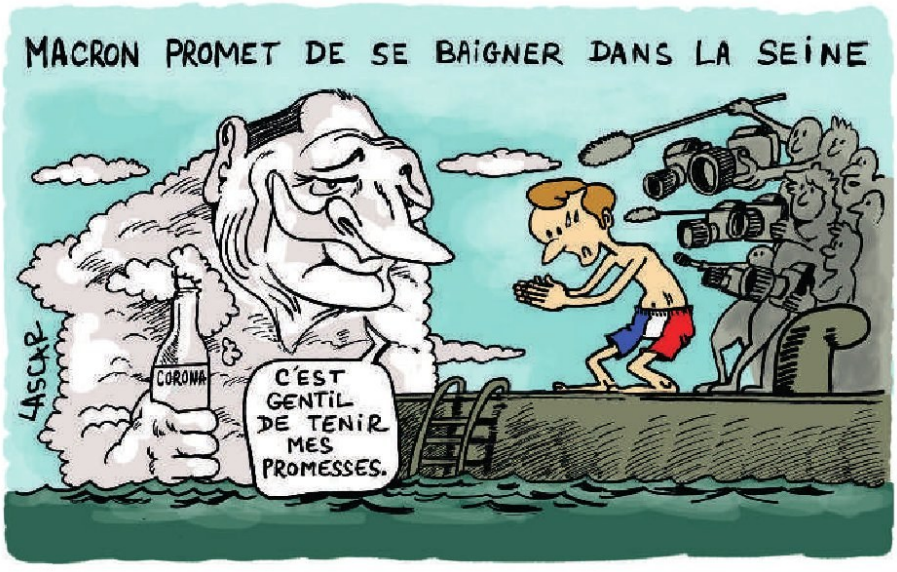
ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Chine : séjour en « terra incognita » ou expédition vers le futur ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

BRUNO LÉVY

Je suis retourné en Chine au début du mois de mars où j'ai vécu une expérience déconcertante. Non seulement, le pays s'est beaucoup construit, modernisé et enrichi depuis quinze ans, ce que nous savons tous, mais le numérique y prend désormais une part considérable, au mépris parfois des libertés individuelles. Il n'y a plus de billets de banque, ni de pièces de monnaie. On n'accepte que très rarement les cartes de crédit étrangères. En pratique, on ne paie plus qu'au moyen d'applications disponibles sur son téléphone, comme WeChat. Pour disposer d'un compte, on doit être parrainé par une personne abonnée à ce réseau depuis au moins six mois. Les plateformes permettant de passer des appels vocaux, telles WhatsApp ou Viber, ne fonctionnent pas, sauf Skype. Les réseaux sociaux occidentaux, Meta, X ou LinkedIn, sont bloqués. On n'a pas accès à la plupart des journaux, en particulier au *Monde*. À cela il faut ajouter que toutes les applications Google sont filtrées ; ainsi en va-t-il de Google Maps, des comptes courriels Google et du moteur de recherche du même nom, aussi bien que de tous les autres d'ailleurs, mis à part Baidu, à condition de le faire dans la langue chinoise… Bien sûr, il est possible de passer outre en utilisant un réseau virtuel personnel (VPN). Beaucoup de Chinois le font, même si c'est interdit ; à défaut, ils n'auraient aucune idée des toutes dernières innovations technologiques, par exemple des progrès récents en IA générative avec chatGPT. Rentré en France, alors qu'en mon for intérieur j'accusais le pouvoir autoritaire chinois d'être seul responsable de ces nouvelles formes de coercition, j'ai été invité à commenter sur un plateau de télévision l'arrestation en Allemagne de Daniela Klette, une terroriste de la Fraction Armée rouge qui se cachait depuis trente ans sous une fausse identité : on l'a retrouvée grâce au moteur de recherche pimEyes, en utilisant une ancienne photo artificiellement vieillie avec un logiciel d'intelligence artificielle. En somme, et pour reprendre la morale d'une fable de La Fontaine, « *on se voit d'un autre œil qu'on ne voit son prochain* »… ■



L'ŒIL DE LASCAR

« Dans trois ans, *j'irais me baigner dans la Seine devant témoins pour prouver qu'elle est devenue un fleuve propre »*, avait promis en 1990 l'ancien président de la République Jacques Chirac, alors maire de Paris. L'immersion n'a pas eu lieu. Mais la promesse est désormais reprise par le président Emmanuel Macron, qui a assuré qu'il plongerait dans la Seine à l'occasion des jeux Olympiques. 1,4 milliard d'euros a été investi depuis 2016 pour rendre baignable le fleuve et son affluent la Marne. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

NUTRITION

Quel est le piment le plus fort du monde ?

M. Borès

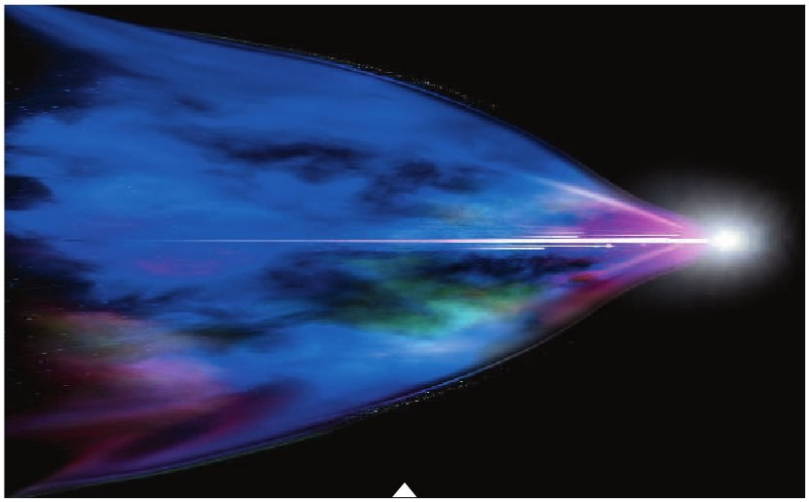
C'est le Pepper X, créé par une entreprise américaine, qui atteint le score astronomique de 3 180 000 sur l'échelle de Scoville ! Cette échelle a été établie en 1912 par le pharmacien américain Wilbur Scoville en fonction du nombre de dilutions nécessaires pour ne plus sentir les effets de la capsaïcine, la molécule responsable de la sensation de brûlure dans le piment. La sauce Tabasco, par exemple, obtient le score de 5000 sur cette échelle, alors que le poivron est inférieur à 100. Le Pepper X s'approche ainsi du score obtenu par une bombe d'autodéfense, d'environ 5 millions, mais est encore loin de celui de la capsaïcine pure, qui est de 16 millions ! ■ **L. L.**

ARCHÉOZOOLOGIE

Comment l'humain a-t-il domestiqué le loup ?

Max B.

Les loups se seraient rapprochés des humains pour se nourrir et, petit à petit, ont été totalement apprivoisés pour la chasse, un lien qui perdure avec le chien. Sur le site de Shubayqa (Jordanie), occupé par les humains à partir d'environ -10 000 ans, de nombreux ossements d'animaux ont été découverts, trop gros pour avoir été avalés par l'humain mais plutôt digérés par des chiens sauvages. Ces derniers devaient permettre de chasser les proies petites et rapides avec plus de succès. Ils n'étaient pas tenus en marge de la colonie, sans doute s'y promenaient-ils librement et étaient-ils intégrés à tous les aspects de la vie quotidienne. ■ **L. L.**



PATRICK LANDMANN / SCIENCE PHOTO LIBRARY / SUCRÉ SALÉ

Si, dans le vide, une particule ne peut pas aller plus vite que la lumière, elle peut en revanche la dépasser dans certains milieux.

PHYSIQUE

Dépasser la vitesse de la lumière, est-ce possible ?

Tabu F. L.

Dépasser la vitesse de la lumière dans le vide (299 792 kilomètres par seconde environ) est impossible. Le principe a été énoncé en 1905 par Albert Einstein. D'après sa théorie de la relativité restreinte, un objet (ou une particule) qui subit une accélération va acquérir de la masse. En accélérant jusqu'à atteindre la vitesse de 299 792 km/s, il aurait ainsi potentiellement une masse infinie. Or, pour qu'un objet accélère, il faut lui fournir de l'énergie, une énergie d'autant plus importante que l'objet est lourd ! Pour atteindre ou dépasser la vitesse de la lumière, il faudrait donc une énergie de plus en plus grande, jusqu'à tendre vers l'infini, ce qui est impossible. Il n'empêche : dans les années 1960, des physiciens imaginent l'existence de particules, nommées « tachyons », qui circuleraient plus vite que la lumière dans le vide et auraient une énergie qui diminue lorsque la vitesse augmente ! Les caractéristiques hors norme de ces tachyons, ainsi que l'improbabilité de leur observation et les possibles paradoxes qu'engendrerait leur existence, font d'eux un objet d'intérêt pour nombre d'œuvres de science-fiction, comme la série télévisée *Flash*. Cependant, la vitesse de la lumière n'est pas la même partout : elle n'est « que » d'environ 225 000 km/s dans l'eau et 200 000 km/s dans le verre. Ainsi, une particule peut voyager plus rapidement que la lumière dans ces milieux ! Cette découverte étonnante a été réalisée par le physicien russe Pavel Tcherenkov, ce qui lui vaudra le prix Nobel de physique en 1958. ■ **Lise Loumé**

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

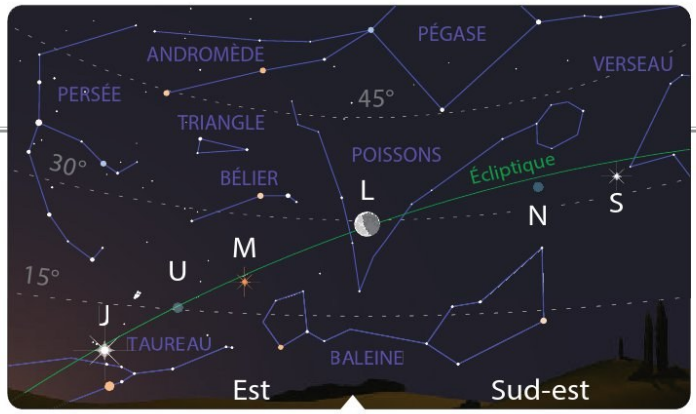
MERCURE
La petite planète passe en conjonction supérieure le 14 et sera éventuellement observable dans les lueurs du couchant en toute fin de mois.

VÉNUS
L'étoile du Berger passe en conjonction supérieure le 4. Elle n'est pas visible ce mois.

MARS
La planète Rouge est difficile à déceler car elle est encore peu lumineuse et toujours prisonnière des lumières matinales. C'est un point à dénicher vers l'est en fin de nuit. Le 10, Mars quitte les Poissons pour le Bélier.

JUPITER
Un mois après son passage en conjonction avec notre étoile, la plus massive des planètes redevient timidement observable au petit matin. Ainsi, elle se lève 2 h avant le Soleil le 30. On trouve Jupiter dans la splendide constellation du Taureau, où elle séjournera encore pendant un an.

SATURNE
La planète aux anneaux se lève en seconde moitié de nuit. Elle se situe à une trentaine de degrés de hauteur vers le sud-est lorsqu'elle disparaît, noyée dans l'éclat croissant du ciel. Saturne réside pour l'heure dans la pâle constellation du Verseau.



En fin de mois, assistez à un bel alignement planétaire matinal. La scène est présentée le 30, 1 heure avant le lever du Soleil.

Le plan visible du Système solaire

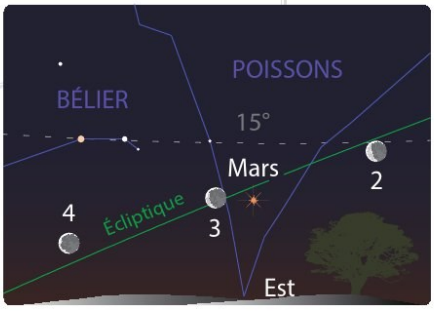
LE MATIN DU 30, faites passer une ligne imaginaire par la Lune (L) et les planètes Jupiter (J), Mars (M) et Saturne (S) : vous aurez alors matérialisé le plan du Système solaire — le plan de l'écliptique — dans lequel les planètes gravitent autour du Soleil. Uranus (U) et Neptune (N) en sont aussi très proches mais, beaucoup trop faibles, ne sont pas visibles à l'œil nu.

Notre conseil Assurez-vous d'avoir un horizon bien dégagé car la planète Jupiter, quoique brillante, sera vraiment basse vers le levant.

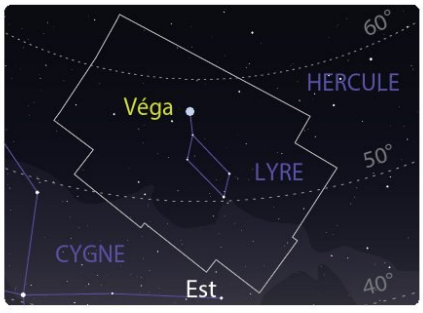
L'appli du mois

WEATHERSATS AR

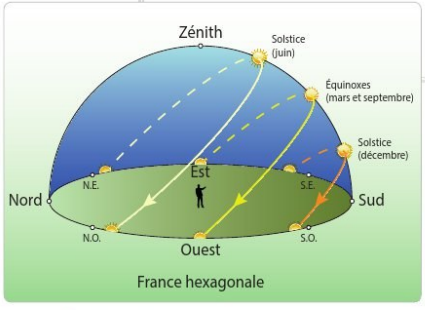
est une application gratuite en anglais pour Android et iOS. Elle permet de se familiariser avec des satellites météorologiques américains chargés de surveiller l'atmosphère et les océans terrestres. À l'aide de la réalité virtuelle, l'utilisateur est mis au défi d'accomplir des missions pour découvrir leur orbite autour de la Terre et leur fonctionnement.



LE MATIN DU 3, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, la Lune en fin dernier croissant se trouvera à 3,5° à l'est de la planète Mars, dans la terne constellation des Poissons.



À LA MI-JUIN VERS MINUIT, la petite constellation de la Lyre est déjà bien haute dans la direction de l'est. La luminosité de son étoile principale, Véga, est remarquable.



LE 20 À 22 H 51, C'EST LE SOLSTICE DE JUIN et donc le début de l'été dans notre hémisphère. Les journées sont particulièrement longues en cette période de l'année.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de juin

JEUX

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

▶ Chasse aux signes

Comment peut-on réaliser cette égalité en intercalant entre les chiffres les signes +, -, ×, et () ?

1 2 3 4 5 6 7 8 9
=
45

▶ Fiançailles

Dans cette addition, chaque lettre représente un chiffre. Trouverez-vous les correspondances pour que le résultat soit juste ?

```
  J O S E
+ R E N E
---------
S O N I A
```

▶ Logique de lettres

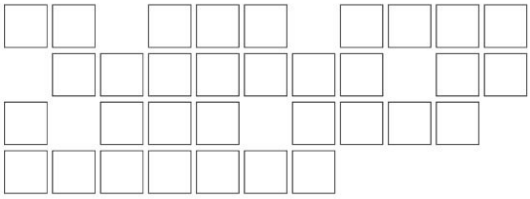
Dans cette suite logique, quelle lettre manque ?

A B D ... P Q R

▶ Goutte-lettre

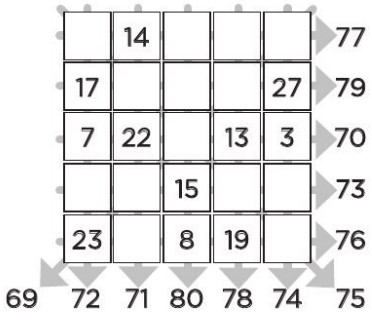
Reconstituez cette citation d'Henri Charrière, dit Papillon, en faisant tomber chaque lettre à sa place dans sa colonne verticale.

H A D A E E E O A E S
L I U E I S I R R N S
T P L N I S M S T
V U



▶ Carré séquentiel

Complétez ce carré magique particulier pour qu'il contienne tous les nombres de 3 à 27 et que chaque ligne, chaque colonne et chacune des diagonales totalisent le nombre indiqué.

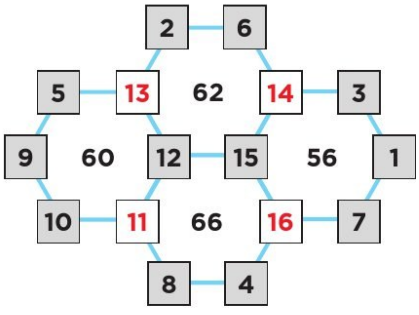


Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 927, mai 2024

▶ Chasse aux signes

1 + 2 + (3 x 4) + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 = 50

▶ Hexagones



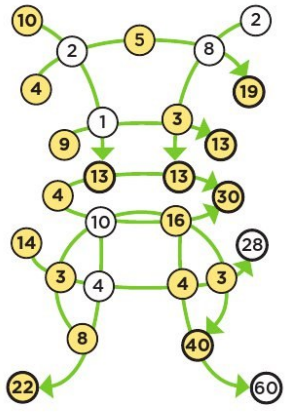
▶ Entre lacs

Côme, Aral, Tenno, Baïkal, Huron, Tchad, Zug, Érié, Tana, Ours, Léman, Do

▶ Addition trouée

```
  2 3 5 8
+ 9 4 4 8
---------
1 1 8 0 6
```

▶ Arabesques numériques



Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

LABORATOIRES ILAPHARM

Pour une santé chaque jour renforcée !

A vos côtés, pour votre santé !

OFFRE DÉCOUVERTE dès **5 €**

Entreprise familiale française depuis 1992, nous vous proposons le meilleur des plantes pour une santé chaque jour renforcée.

** Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

CODE PRIVILÈGE : **CS452**

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables.**

6 € 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(1).*

5 € 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids.** *(1), (7), (9).*

6 € 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel.** Idéal avec le Safran !

7 € 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

7 € 45 gélules

Ballonnement
CHARBON & FENOUIL BIO

Soulage rapidement en cas de **ballonnement** et **flatulences.** *(10).*

6 € 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie.** Pour un **bon confort urinaire.**

7 € 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux.** *(4), (6).*
Allergène : **poisson.**

5 € 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** dans le sang. *(5), (11).*

6 € 30 gélules

Érection
SAFRAN BIO

Le Safran participe au maintien de la **fonction érectile.** Idéal avec la Maca ! *(2).*

7 € 20 gélules

Un esprit vif
GINKGO BILOBA BIO

Arbre de jouvence, il favorise votre circulation cérébrale pour **un esprit vif et alerte.** *(2), (5).*

5 € 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie.** *(7).*

6 € 45 gélules

Endurance et puissance
TRIBULUS

Il favorise la **capacité** et les **performances sexuelles.** *(8).*

6 € 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité.** Ni accoutumance, ni somnolence.

6 € 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !** *(9), (12).*

5 € 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO

Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(7).*

6 € 45 comprimés

Vos 3 Cadeaux

Le Rasoir "Nomade" OU La Montre Femme

1 cadeau au choix **OFFERT**

Rasoir *électrique livré avec 1 cache de protection, fonctionne avec 2 piles AA chacun, non incluses.*
Montre Femme : *taille du boîtier : 2,8 cm, longueur : 23 cm, mouvement à quartz.*

Les Frais de Port Dès 15€ d'achat **OFFERTS** — **0 €** *Au lieu de 6,50€*

dès **5 €** **TOUS VOS PRODUITS EXEMPLE :**

Harpagophytum BIO	5,00€
Spiruline BIO	6,00€
Huile de Courge BIO	7,00€
Safran BIO	7,00€
Maca BIO	7,00€
Le Rasoir OU La Montre	OFFERT
Frais de port	OFFERTS
TOTAL	**32,00€**

Tous nos produits sont déconseillés aux enfants de moins de 18 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (2) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (3) Contient de la caféine (50 mg par jour). (4) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (5) Ne pas associer avec des anticoagulants. (6) Possible effet laxatif. (7) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (8) Déconseillé en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. (9) Déconseillé en cas de troubles cardiaques.. (10) Déconseillé en cas de d'allergie croisée connue, en particulier à la famille des Apiaceae. (11) Déconseillé en cas de traitement concomitant par un médicament anti-rétroviral. (12) Déconseillé en cas d'insuffisance rénale œdémateuse. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

BON DE COMMANDE - COMMANDE FACILE SUR WWW.ILAPHARM.COM

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Votre date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|

E-mail* : .....

pour recevoir les **offres des partenaires des Laboratoires ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

**** Recommandé pour la livraison.***

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_| |_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		7€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		7€	
Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		7€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		7€	
Ginkgo Biloba BIO	PGBB45		5€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PGRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** ☐ **mon RASOIR** ou ☐ **ma MONTRE** et mon **CATALOGUE**				**OFFERTS**
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 6,50€ sur les frais de port**				**OFFERTS**
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€ de port**				
CODE PRIVILÈGE : **CS452**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS
*Envoyez votre **réglement par chèque**, **avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad — synadiet — La Poste

SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

Par téléphone :
01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

Par courrier :
Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 48h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

ORANGINA SCHWEPPES FRANCE SAS – RCS NANTERRE B 404 907 941 – CAPITAL SOCIAL : 446 036 924 € -

POUR VOTRE SANTÉ, ÉVITEZ DE GRIGNOTER ENTRE LES REPAS. WWW.MANGERBOUGER.FR